

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль: «Энергосберегающие режимы работы электрических источников питания, комплексов и систем»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Автоматизированная система регулирования напора воды в системах отопления

УДК 62-83-52:697.4

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Л	Коваль Сергей Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев Александр Юрьевич	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально-гуманитарных наук	Фигурко Аркадий Альбертович	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения контроля и диагностики	Бородин Юрий Викторович	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Отделение электроэнергетики и электротехники	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Дементьев Юрий Николаевич	PhD, к.т.н.		

Томск – 2018 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль: «Электроприводы и системы управления электроприводов»

УТВЕРЖДАЮ:

Рук. отделения

(Подпись) _____ (Дата) Ю.Н. Дементьев
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Л	Коваль Сергей Александрович

Тема работы:

Автоматизированная система регулирования напора воды в системах отопления
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:	13.06.2018
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	<ul style="list-style-type: none">• обеспечить функционирование системы управления асинхронным электроприводом;• разработать имитационную модель асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором;• провести анализ характеристик электропривода и других зависимостей, полученных в ходе выполнения работы.
--	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Обзор технической литературы по теме асинхронного электропривода. Моделирование асинхронного электропривода. Технические решения по реализации управления электроприводом по системе ПЧ-АД. Исследования асинхронного электропривода. Заключение</p>			
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>1. Структурная схема. 2. Имитационная модель. 3. Презентация.</p>			
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p>				
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>			
<p>«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»</p>	<p>Фигурко Аркадий Альбертович</p>			
<p>«Социальная ответственность»</p>	<p>Бородин Юрий Викторович</p>			
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>				
<p>Введение; составление математической модели синхронного электропривода; заключение.</p>				
<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>				<p>9.09.2016 г.</p>
<p>Задание выдал руководитель:</p>				
<p>Должность</p>	<p>ФИО</p>	<p>Ученая степень, звание</p>	<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>Доцент</p>	<p>Чернышев Александр Юрьевич</p>	<p>к.т.н.</p>		
<p>Задание принял к исполнению студент:</p>				
<p>Группа</p>	<p>ФИО</p>		<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>5АМ6Л</p>	<p>Коваль Сергей Александрович</p>			

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСО- СБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6Л	Коваль Сергей Александрович

Инженерная школа	ИШЭ	Отделение	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистр	Направление	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	30 % премии 20 % надбавки 16% накладные расходы 30% районный коэффициент
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	27,1 отчисления на социальные нужды

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Анализ конкурентных технических решений. Оценки перспективности проекта по технологии QuaD.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Формирование плана и графика разработки : -определение структуры работ; - определение трудоемкости работ; - разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: - материальные затраты; -заработная плата (основная и дополнительная); - отчисления на социальные цели; - накладные расходы.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Оценочная карта QuaD
3. SWOT-анализ
4. График Ганта
5. График проведения и бюджет НИ
Определение ресурсоэффективности проекта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Фигурко А.А.	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6Л	Коваль С. А.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5AM6Л	Ковалю Сергею Александровичу

Инженерная школа	ИШЭ	Кафедра	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистр	Направление	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	<p>1. <i>Описание рабочего места на предмет :</i> <i>Разработка автоматизированной системы регулирования напора воды в системах отопления на пользовательском компьютере в помещении площадью 72 м². Проведение пуско-наладочных работ на насосной станции подачи тепла, с электрооборудованием напряжением до 220 вольт.</i></p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	<p>1. <i>Анализ опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i> — <i>Электробезопасность.</i> — <i>Составление правил работы с исследуемым оборудованием для предотвращения травматизма от движущихся механизмов.</i></p> <p>2. <i>Анализ вредных факторов, проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i> — <i>Расчет освещения рабочей зоны, которое должно соответствовать СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03, не снижающее зрение человека.</i> — <i>Уменьшение уровня шума.</i> — <i>Проверка уровня воздействия электромагнитного излучения и статического электричества.</i> — <i>Мероприятия для решения проблемы низкой подвижности воздуха.</i> — <i>Мероприятия для уменьшения вибрации.</i></p> <p>3. <i>Охрана окружающей среды:</i> — <i>Правила утилизации твердых неорганических отходов (макулатуры и металла).</i> — <i>Анализ влияния электромагнитного и теплового излучения. Меры уменьшения влияния данных факторов.</i></p> <p>4. <i>Защита в чрезвычайных ситуациях:</i> — <i>Наиболее вероятным ЧС при исследовании и проверке системы ПЧ – СД являются пожар на рабочем месте.</i></p> <p>5. <i>Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</i> — <i>Нормы и правила для допуска к работе.</i> — <i>Перечень законодательных и нормативных документов в порядке их цитирования по пунктам раздела.</i></p>
Перечень расч-го и граф-го материала:	<i>Расчет искусственного освещения для помещения.</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД ИШНKB	Бородин Ю.В.	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM6Л	Коваль С. А.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 146 страниц, 52 рисунка, 15 таблиц, 34 источников, 3 приложения.

Ключевые слова: электропривод, синхронный электродвигатель с постоянными магнитами, система управления, регулятор тока, регулятор скорости, математическая модель синхронного двигателя.

Цель работы – разработка системы регулирования напора воды , обеспечить системы управления на базе ПЧ-АД, предусмотреть функционирование регуляторов давления и температуры.. Разработать математическую и имитационную модель электропривода в среде Matlab Simulink. Получить необходимые характеристики и проанализировать работоспособность рассчитанной системы.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Office Word 2010 с использованием пакетов: Microsoft Visio 2010, Matlab Simulink и представлена на диске (в конверте на обороте обложки).

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС	10
1.1 Описание системы теплоснабжения	10
1.2 Технологическая схема	11
1.3 Выбор насоса.....	11
1.4 Основные параметры насоса	16
1.5 Регулирование потока	19
1.6 Датчик давления	20
2. ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ.....	21
2.1 Проверка двигателя по мощности.....	21
2.2 Расчёт основных параметров и характеристик.....	23
асинхронного электродвигателя.....	23
3. МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ.....	30
3.1 Уравнения асинхронной машины в системе относительных единиц	30
3.2 Имитационная модель линеаризованной модели асинхронного.....	37
электродвигателя в программной среде MATLAB	37
3.3 Динамические характеристики асинхронного электродвигателя	39
при прямом пуске.....	39
4. ВЫБОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ	43
4.1 Преобразователь частоты FDU 40-090 СЕВ	43
5. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ НАСОСА.....	45
5.1 Регулирование скорости электропривода с помощью.....	45
законов $U_{1\phi} / f_1 = \text{const}$, $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$	45
5.2 Регулирование скорости электропривода с помощью.....	50
законов $U_{1\phi} / f_1 = \text{const}$, $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$ с I·R – компенсацией.....	50
6. МЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЭП.....	53
6.1 Кинематическая схема механизма.....	53
6.2 Расчетная схема замещения механической системы	53
7. ВЕКТОРНОЕ ЧАСТОТНО-ТОКОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЭП НАСОСА ...	56
7.1 Оптимальный структурно-параметрический синтез параметров регулятора контура потока	58
7.2 Оптимальный структурно-параметрический синтез параметров регулятора контура тока.....	59
7.3 Оптимальный структурно-параметрический синтез параметров регулятора контура давления	60
7.4 Имитационная модель векторного частотно-токового управления РЭП насоса	62
7.5 Динамические характеристики системы векторного частотно-токового управления.....	66

8. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	67
8.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	67
8.2. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований	77
8.3. Планирование научно-исследовательских работ	78
8.4. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта ..	90
Вывод по разделу	92
9. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	93
9.1. Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению	93
9.2. Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению	94
9.3. Охрана окружающей среды.....	97
9.4. Защита в чрезвычайных ситуациях	99
9.5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	100
Вывод по разделу	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	103
Список литературы	104
Приложение А	106

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние систем теплоснабжения требует значительных капиталовложений и инвестиций для обновления магистральных сетей. Первоочередной задачей остаётся продление срока службы теплотрасс. Решение данной задачи возможно осуществить за счёт оптимизации тепло-гидравлических характеристик и приведении параметров магистрали к реальной нагрузке. Применение систем регулирования давления в условиях открытого водоразбора системы позволяет решить часть этой проблемы. С практической точки зрения осуществить регулировку давления возможно за счёт применения регулируемого электропривода (РЭП). В настоящее время электропривода большинства установок выполняются на основе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, управляемых преобразователем частоты.

Однако большинство промышленных предприятий уже имеют исполнительное устройство с электродвигателем. Система преобразователь частоты-асинхронный двигатель (ПЧ-АД), в сравнении с приводами постоянного тока, имеет свои достоинства и недостатки. Основными достоинствами являются простота в настройке системы и эксплуатации. Основным недостатком высокая стоимость преобразователя частоты. Также эта система обладает рядом особенностей:

1. Многообразие преобразователей частоты с одинаковыми техническими характеристиками;
2. Возможность управления потоком и моментом со стороны статора;
3. Применение вращающейся системы координат для рассмотрения процессов в асинхронном двигателе.

Целью дипломного проекта является рассмотрение векторного частотно-токового управления для построения имитационной модели во вращающейся системе координат с последующей реализацией в системе РЭП магистрального насоса теплосети.

1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

1.1 Описание системы теплоснабжения

Система теплоснабжения Кожевниковского района включает в себя четыре основных параллельных контура. Система с открытым водоразбором подразумевает нестабильность рабочей точки насоса. В некоторых домах района воду для технических нужд берут прямо из системы теплоснабжения. Поэтому замкнутая система на практике является системой с изменяемым расходом и давлением. Следовательно, здесь необходима как регулировка давления в зависимости от расхода в весенний сезон с профилактическими работами, так и его поддержание на заданном уровне в зимний период. Изменение расхода осуществляется посредством дросселирования с помощью регулирующего клапана. Таким образом, изменяется сопротивление трубопроводной сети. Это очень простой, но крайне неэкономичный способ.

Запуск насоса осуществляется на минимальной нагрузке. Такой режим можно осуществить, закрывая заслонку, отсекающую нагрузку от насоса. Если такой задвижки нет, то в момент запуска насоса в системе теплоснабжения будут возникать гидравлические удары, которые пагубно сказываются на долговечности насоса. После пуска насос выходит на рабочую точку, благодаря постепенному открытию заслонки. Напряжение питающей сети нестабильно, поэтому возможны кратковременные провалы насоса. Электромагнитный момент АД питающего напряжения имеет квадратичную зависимость, которая показывает возможный останов двигателя насоса при небольших уменьшениях напряжения. При последующих запусках насоса, необходимо повторять все требуемые действия для вывода на рабочую точку. Данные мероприятия являются затратными и становятся не целесообразными при частных провалах напряжения[1].

Часто после запуска насоса вовремя не открывается заслонка или она закрывается в процессе работы насоса. В системах теплоснабжения это приводит к кавитации. При вращении колеса насоса вспенивает непроточную

нагретую воду, в результате чего происходит «закипание» жидкости с образованием упругих пузырьков, которые разбивают крыльчатку. Явление сопровождается появлением шума.

1.2 Технологическая схема

На рисунке 1 приведена схема системы теплоснабжения котельной. Для подогрева воды в системе смонтированы котлы $K_1 - K_5$, работающие на твёрдом угле. На котлах установлены датчики давления и температуры $P_1 - P_5$, $T_1 - T_5$. Циркуляция воды обеспечивается насосами $H_1 - H_3$. Насос H_3 – новый с датчиком давления P_7 и механическим фильтром Φ_1 . Для предотвращения обратного тока воды через насос предусмотрены обратные клапаны $Z_8 - Z_{10}$. Клапаны $Z_5 - Z_7$ – запорно-регулирующие. На входе системы также установлены большой фильтр-отбойник Φ_2 , запорный клапан Z_4 , входные датчики температуры T_6 и давления P_8 .

1.3 Выбор насоса

Основным показателем при подборе циркуляционного сетевого насоса системы теплоснабжения является определение потребляемой тепловой энергии всех зданий, согласно рассчитанной нагрузки для наиболее холодного времени года. Предварительно её вычисляют по площади отапливаемого помещения. По европейским стандартам на обогрев 1 м^2 в домах с несколькими квартирами требуется 100 Вт, а для домов с 3 и более квартир необходимо 70 Вт. В случае несоответствия здания требуемым нормам, проектировщику необходимо использовать в расчёт значение удельного потребления тепла выше, чтобы учесть необходимые недочеты. Для жилых домов с улучшенной теплоизоляцией и производственных помещений требуется $30 - 50 \text{ Вт/м}^2$. СНиП 2.04.07-86* «Тепловые сети» рекомендует рассчитывать максимальный тепловой поток на отопление 1 м^2 общей площади жилых домов, строящихся с 1985 года по новым типовым проектам, по следующим укрупнённым показателям:

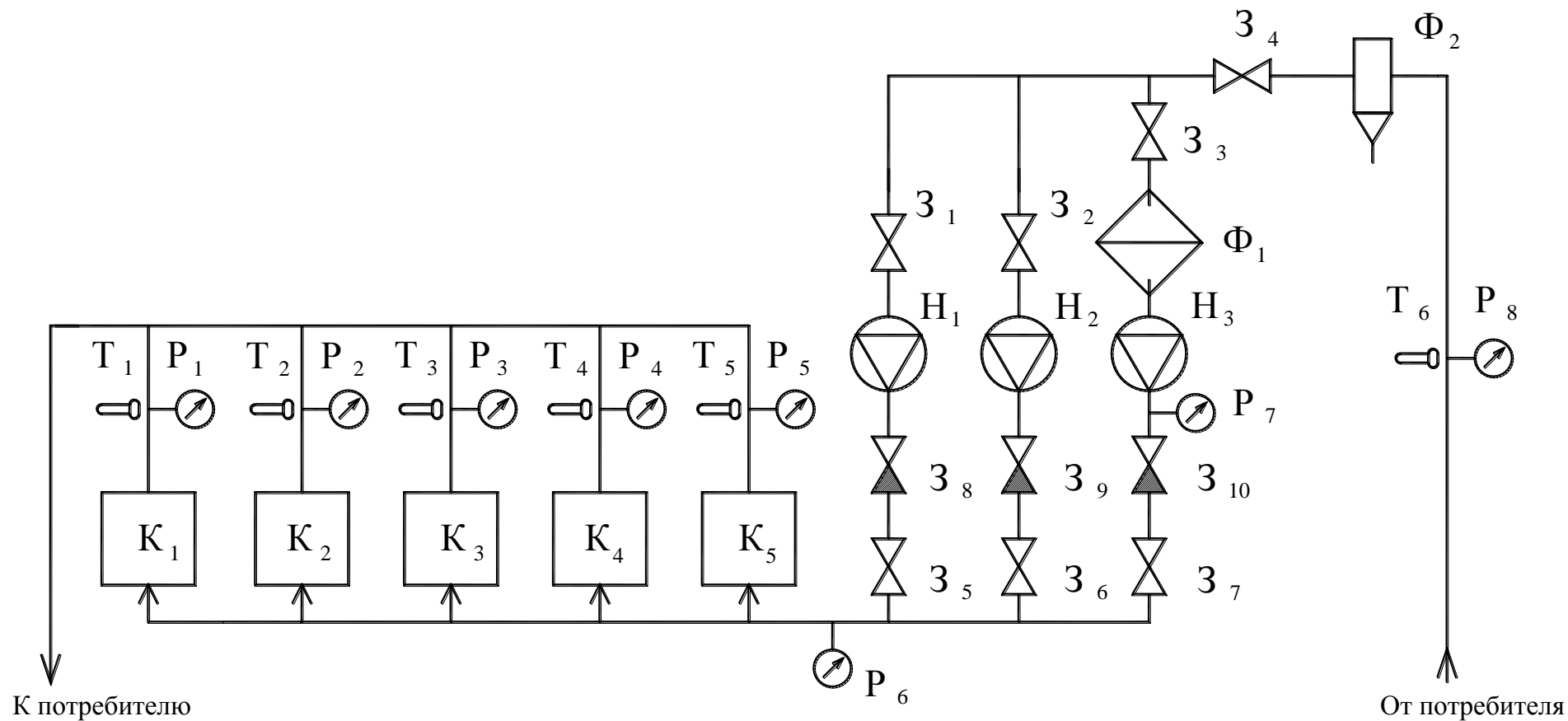


Рисунок 1. Технологическая схема котельной системы теплоснабжения

Т – датчик температуры; Р – датчик давления; З – клапан; К – водонагревательный котёл; Ф – фильтр; Н – насос;.

- для 1 – 2-этажных зданий – 173 Вт/м^2 при расчётной температуре наружного воздуха – 25°C и 177 Вт/м^2 при -30°C ;
- для 3 – 4-этажных зданий – соответственно 97 и 101 Вт/м^2 .

Определив потребление тепла $\Sigma G = 5960458,4 \text{ ккал}$, следует перейти к расчёту требуемой производительности насоса. В приложении к СНиП 2.04.05-91* представлена данная формула:

$$Q = \frac{3,6 \cdot \Sigma G}{c \cdot \Delta T}; \quad [\text{кг/ч}] \quad (1.1)$$

где c – удельная теплоёмкость воды, равная $4,2 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$;

ΔT – разница температур в подающем и обратном трубопроводах схемы отопления ($\Delta T = 22^\circ\text{C}$);

Для пересчёта полученной величины в $\text{м}^3/\text{ч}$ необходимо её разделить на плотность воды при расчётной температуре; при 80°C она составляет $971,8 \text{ кг/м}^3$. Итоговую формулу для расчёта производительности насоса при учёте записи теплопотерь в килокалориях можно упростить:

$$Q = \frac{\Sigma G}{\Delta T} = \frac{5960458,4 \cdot 10^{-3}}{22} \approx 275 \text{ м}^3/\text{ч} \quad (1.2)$$

Насосу необходимо обеспечивать требуемое давление, чтобы преодолеть сопротивление трубопроводной сети теплоснабжения. Для этого необходимо определить потери самого протяжённого участка магистральной линии. Система теплоснабжения является четырехконтурной. Производим расчёты для самого протяженного контура $H = 45 \text{ м}$.

Рабочей характеристикой насосного агрегата называют зависимость между подачей насоса Q , $\text{м}^3/\text{ч}$; и развиваемым им напором H , м. Напор равен высоте, на которую может подняться жидкость над поверхностью отсчёта.

Для нормальных условий работы основного центробежного насоса необходим подпор жидкости на его входе, который обычно создаётся вспомогательным подпорным насосом. В рассматриваемой системе данный насос включается при снижении давления на входе.

В настоящее время в качестве циркуляционных широко применяются насосы с «сухим» ротором. В них электродвигатели не соприкасаются с перекачиваемой водой. К ним относятся традиционные консольные, моноблочные, а также Inline-насосы [2].

Используя заданные и вычисленные параметры системы, производится выбор насоса. Для этого использована программа поиска и подбора насосного оборудования международного концерна Grundfos: Grundfos Product Center.

Последовательность действий при работе с программой:

1. Выбираем закладку «Выбор параметров»
2. Далее в окне задаём требуемые параметры (см. рисунок 2) и нажимаем «Начало выбора параметров»

The screenshot displays the 'Общий' (General) configuration window of the Grundfos Product Center software. On the left, a vertical sidebar contains five buttons: 'Циркуляционный' (Circulation), 'Параллельное подкл. к котлу' (Parallel connection to boiler), 'Фильтр для жидкости' (Filter for liquid), 'Система с радиатив. теплообмен' (System with radiative heat exchanger), and 'Горячая вода для бытовых нужд' (Hot water for domestic use). The main area is titled 'Общий' and contains various input fields and dropdown menus for specifying pump parameters. The parameters and their values are as follows:

Parameter	Value	Unit
Задание параметров расхода	275	м3/ч
Общий напор	45	м
Регулирование скорости	Да	
Разработка насоса	Консольный	
Муфта	Стандарт	
Требуется щелевое уплотнение	<input checked="" type="checkbox"/>	
Число полюсов	2	
Частота, фаза	3-фазный, 50 Гц	
Пуск трехфазный	Прямое	
Напряжение	380	В
Тип соединения насоса	Фланец	
Размер фланца		
Материал насоса	Чугун	
Макс. рабочее давление	16	бар

Рисунок 2. Рабочее окно программы Grundfos – Grundfos Product Center

На рисунке 3 приведены следующие характеристики: насоса $H = f(Q)$; магистральной; мощности двигателя $P_2 = f(Q)$; напора на входе $NPSH = f(Q)$; КПД насоса $\eta = f(Q)$.

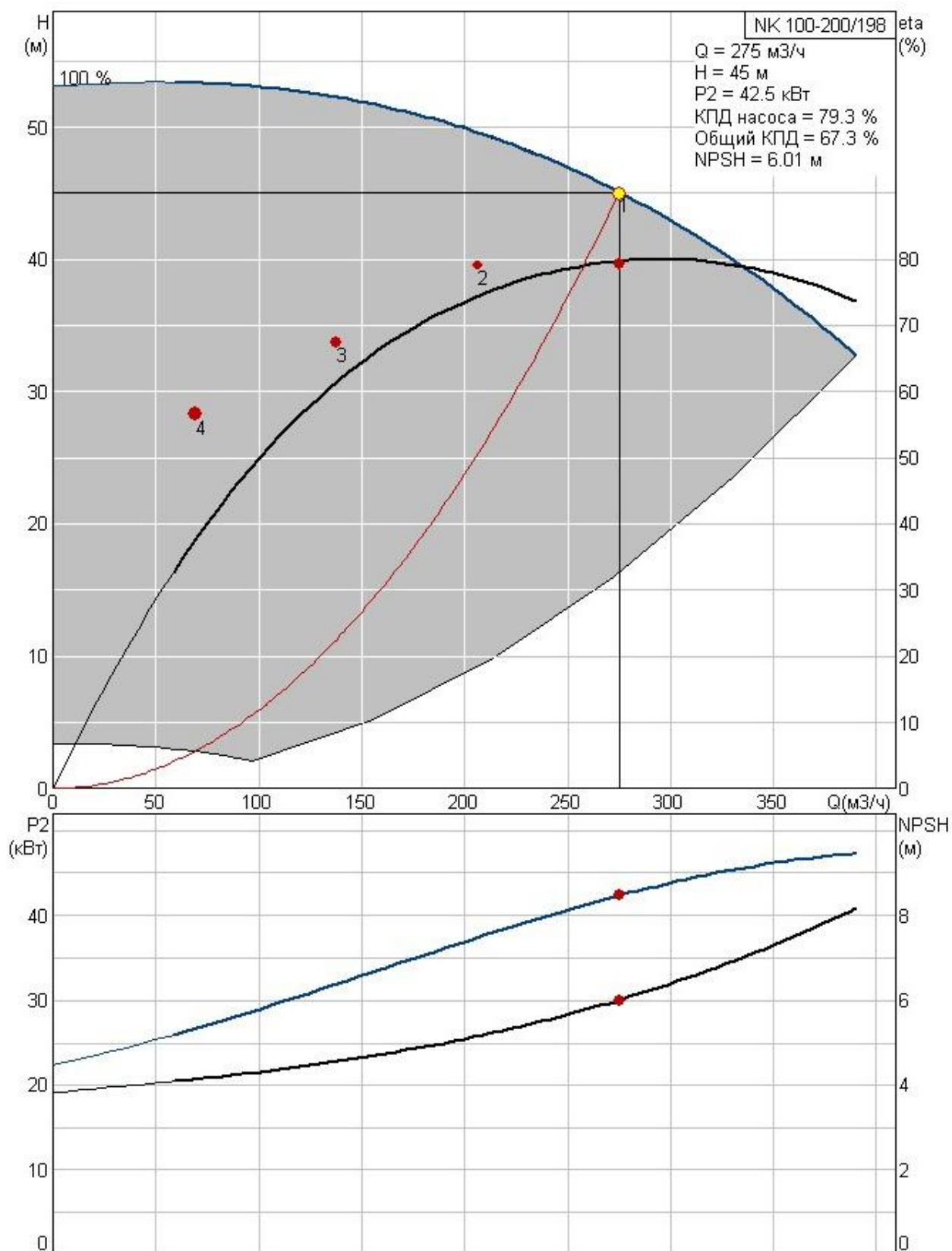


Рисунок 3. Характеристики насоса

Данные характеристики являются основой для подбора насоса. Программа подобрала насос NK 100 – 200/198, где 100 – номинальный диаметр выход-

ного патрубка; 200 – номинальный диаметр рабочего колеса, 198 – фактический диаметр рабочего колеса в миллиметрах.

1.4 Основные параметры насоса

Насос предназначен для подачи чистых или слегка замутнённых жидкостей без абразивных или длиноволокнистых включений и веществ, агрессивных по отношению к материалу деталей насоса. Области применения:

- Отопительное оборудование.
- Системы водоснабжения.
- Системы вентиляции и кондиционирования.
- Перекачивание воды в системах водяного охлаждения.
- Перекачивание производственно-хозяйственной воды.
- Противопожарное оборудование.
- Дождевальные и ирригационные системы.

Одноступенчатый центробежный насос с горизонтальным расположением вала, осевым всасывающим и радиальным напорным патрубками. Размеры и технические характеристики насоса НК соответствуют стандарту EN 733, 10 бар, корпус и торцевое уплотнение насоса рассчитаны на давление 16 бар. Фланцы на всасывающем и напорном патрубках соответствуют EN 7005 PN 10/16. Все насосы гидравлически разгружены от осевой нагрузки в соответствии с ISO 1940 класс 6.3. Рабочее колесо гидравлически сбалансировано.

Параметры перекачиваемой жидкости:

- Минимальная температура жидкости: -10°C
- Максимальная температура жидкости: 120°C

Технические данные:

Тип уплотнения вала: BAQE; В – Резиновое сильфонное уплотнение, А – Графит с диффузионным насыщением металлом (антифрикционное кольцо), Q – Карбид кремния (контркольцо), Е – EPDM (вспомогательное уплотнение).

Материалы насоса:

- Материал, корпус насоса: Чугун; EN-JL1040 DIN W.-Nr.
- Class 35-40 ASTM
- Материал, рабочее колесо: Чугун; EN-JL1040 DIN W.-Nr.
- Class 35-40 ASTM

Условия для монтажа:

- Максимальная температура окружающей среды: 60°C
- Максимальное рабочее давление: 16 бар
- Стандартное соединение труб: DIN
- Размер входного патрубка насоса: DN 125
- Размер выходного патрубка насоса: DN 100
- Тип муфты: Проставка
- Щелевое уплотнение: Присутствует
- Опорная рама: C-Channel
- Остальное: Нетто-вес: 402 кг

Насос поставляется в собранном состоянии и состоит из основной насосной части, плиты-основания, муфты с защитным кожухом и электродвигателем в соответствии с DIN 24 259.



Рисунок 4. Насос с двигателем в сборе

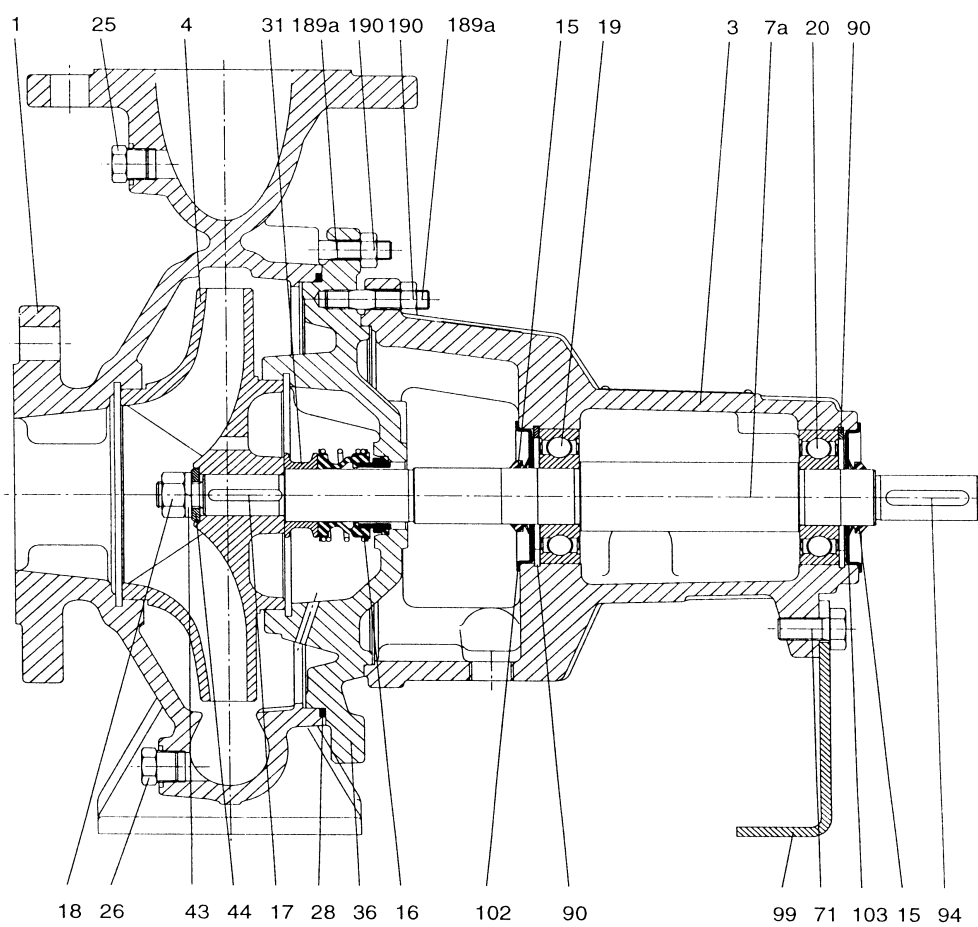


Рисунок 5. Вид насоса в разрезе

Таблица 1. Составляющие компоненты насоса

По з.	Наименование	Поз.	Наименование
1	Корпус насоса	31	Распорная втулка к торцевому уплотнению
3	Корпус подшипника	36	Крышка корпуса
4	Рабочее колесо	43	Шайба граверная
7а	Вал	44	Шайба для фиксации рабочего колеса
15	Контркольцо	71	Стяжной болт
16	Торцевое уплотнение	90	Пружинное кольцо
17	Призматическая шпонка	94	Шпонка для муфты
18	Установочная гайка	99	Опора
19	Шарикоподшипник 6306-2Z-СЗ	102	Крышка подшипника
20	Шарикоподшипник 6306-2Z-СЗ	103	Крышка подшипника
25	Пробка с резьбой	189а	Шпилька
26	Пробка для слива	190	Гайка
28	Уплотнительное кольцо		

1.5 Регулирование потока

Наиболее простым и часто применяемым методом регулирования скорости насоса является уменьшение сечения напорного трубопровода, то есть создание дополнительного сопротивления потоку воды, что достигается закрытием регулирующего органа клапана. Поскольку каждой степени закрытия регулирующего органа соответствует определённая потеря напора, можно получить любой режим работы насоса вплоть до нулевой подачи.

Достоинством этого метода является то, что процесс дросселирования легко поддаётся автоматизации и дистанционному управлению и не требует установки специального дополнительного оборудования. Однако при этом методе регулирования снижается коэффициент полезного действия насосов и увеличивается удельный расход электроэнергии. При дросселировании обычно применяют схему с установкой регулирующего органа на выходе насосной станции. Перспективной альтернативой данному методу регулирования является частотное регулирование скорости асинхронного электродвигателя. Для дан-

ного насоса не требуется большой диапазон изменения скорости. Поэтому здесь опасные малые скорости, при которых двигатель может перегреваться не требуются. На рисунке 6 изображена схема насоса в сборе с габаритными и установочными размерами.

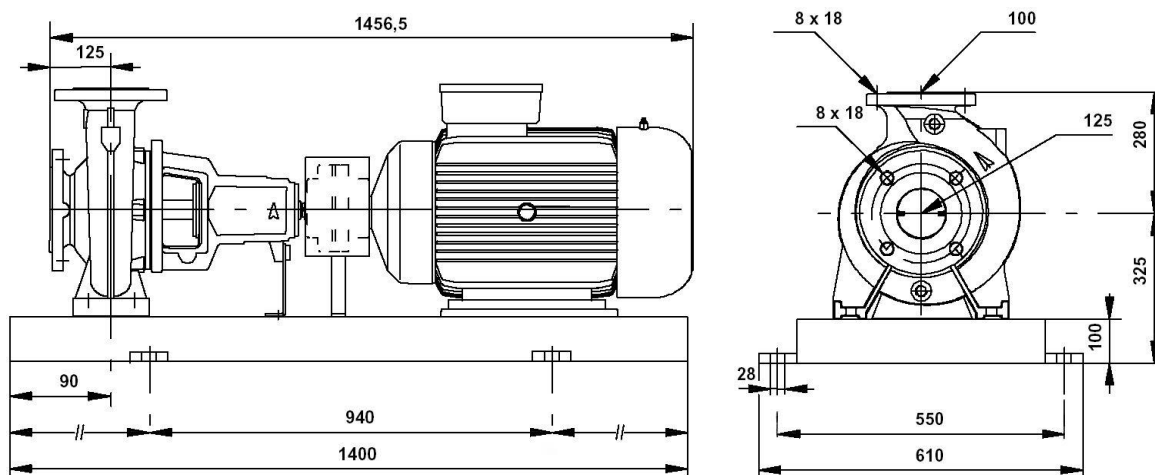


Рисунок 6. Насос с двигателем с установочными и габаритными размерами

1.6 Датчик давления

Для контроля давления на выходе насоса необходим датчик давления. Выбор датчика осуществляется в соответствии с рабочими характеристиками и возможностью сопряжения с другим оборудованием. Выбираем датчик MBS 1700(060G61076) производства Danfoss [3].

Датчик предназначен для непрерывного преобразования избыточного давления в унифицированный токовый сигнал 4 – 20 мА. Изготовлен на основе тензорезистивных чувствительных элементов. Состоит из блока чувствительного элемента и электронного преобразователя. Блок состоит из штуцера, выполненного из коррозионностойкого сплава, коррозионностойкого разделителя и тензочувствительного элемента. Электронный преобразователь расположен на печатной плате и помещён в корпус с герметизирующим резиновым кольцом. На торце корпуса расположены клеммная колодка и регулировочные отверстия

для коррекции минимального и максимального значений токового выхода. На рисунке 7 изображен преобразователь давления MBS-1700 [2].



Рисунок 7. Преобразователь давления MBS-1700 фирмы Danfoss

Основные технические характеристики:

- Пределы измерений в кгс/см²: от 0 до 6.
- Штуцер с резьбой G 1/2
- Высокая виброустойчивость
- Рабочая температура окружающей среды: от -40 до +70°C
- Средний срок службы 10 лет
- Корпус и основные части из нержавеющей стали (AISI 316L)
- Напряжение питания 9-32 В
- Предельный ток 28 мА
- Время реакции 4 мс
- Класс точности 0,5
- Класс защиты IP65
- Масса прибора не более 0,45 кг

2. ВЫБОР ДВИГАТЕЛЯ

2.1 Проверка двигателя по мощности

Мощность двигателя выбранного насоса по программе должна быть не менее 42,4 кВт (см. рисунок 3). Проводим проверку данной величины:

$$P_{\text{эд}} = \frac{g \cdot Q \cdot H}{\eta_{\text{н}} \cdot 3600} = \frac{9,81 \cdot 275 \cdot 45}{0,795 \cdot 3600} = 42,418 \text{ кВт}, \quad (2.1)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

В соответствии с ISO 5199 обеспечивается запас по мощности двигателя. Поэтому мощность двигателя должна быть не менее 45 кВт. По данной величине и рекомендациям производителя насоса, концерна Grundfos [2], выбираем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии MMG. Паспортные данные двигателя MMG225M приведены в таблице 2.

Таблица 2. Паспортные данные двигателя MMG225M

Заданные величины	Условное обозначение	Единица измерения	Численное значение
Фазное напряжение обмотки статора $U_{\text{вл}} = 380 \text{ В}$	$U_{\text{1ф}}$	В	220
Мощность двигателя	$P_{\text{дв}}$	кВт	45
Номинальная скорость ротора	$n_{\text{н}}$	об/мин	2950
КПД двигателя	$\eta_{\text{н}}$	о.е.	0,92

Продолжение таблицы 2

Синхронная частота вращения ротора	n_0	об/мин	3000
Коэффициент мощности двигателя	$\cos \varphi_{\text{н}}$	о.е.	0,88
Кратность пускового тока	k_i	о.е.	7,9
Кратность пускового момента	$k_{\text{п}}$	о.е.	2,4
Кратность максимального момента	$k_{\text{макс}}$	о.е.	3

2.2 Расчёт основных параметров и характеристик асинхронного электродвигателя

Произведём расчёт основных параметров асинхронной машины для построения механической и электромеханической характеристик асинхронного электродвигателя[4].

Величина синхронной угловой скорости:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314,159 \text{ рад/с}; \quad (2.2)$$

Номинальное скольжение:

$$S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{3000 - 2950}{3000} = 0,0167 \text{ о.е.}; \quad (2.3)$$

Номинальный ток обмотки статора двигателя:

$$I_{1H} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1\Phi} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{45 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,92} = 84,22 \text{ А}; \quad (2.4)$$

Современные асинхронные двигатели проектируются таким образом, что наибольший КПД достигается при загрузке на 10 – 15 % меньше номинальной. Коэффициент мощности при нагрузке равной $0,75 \cdot P_H$ значительно отличается от мощности при номинальной нагрузке, причем это отличие сильно зависит от мощности двигателя и для известных серий асинхронных двигателей с достаточной для практики точностью подчиняется зависимости, приведённой на рисунке 7.

Коэффициент мощности при частичной загрузке:

$$\cos \varphi_{p*} = 0,99 \cdot \cos \varphi_H = 0,99 \cdot 0,88 = 0,871 \text{ о.е.}; \quad (2.5)$$

Коэффициент загрузки двигателя принимаем $p_* = 0,75$ из-за указанных выше особенностей проектирования асинхронных двигателей.

Тогда ток статора двигателя при частичной загрузке равен:

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{3 \cdot U_{1\Phi} \cdot \cos \varphi_{p*} \cdot \eta_H} = \frac{0,75 \cdot 45 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,871 \cdot 0,92} = 63,801 \text{ А}; \quad (2.6)$$

Ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$\begin{aligned}
I_0 &= \sqrt{\frac{I_{11}^2 - [p_* \cdot I_{1H}(1 - S_H)/(1 - p_* \cdot S_H)]^2}{1 - p_* \cdot (1 - S_H)/(1 - p_* \cdot S_H)^2}} = \\
&= \sqrt{\frac{63,801^2 - [0,75 \cdot 84,22 \cdot (1 - 0,0167)/(1 - 0,75 \cdot 0,0167)]^2}{1 - [0,75 \cdot (1 - 0,0167)/(1 - 0,75 \cdot 0,0167)]^2}} = \\
&= 16,098 \text{ А;}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

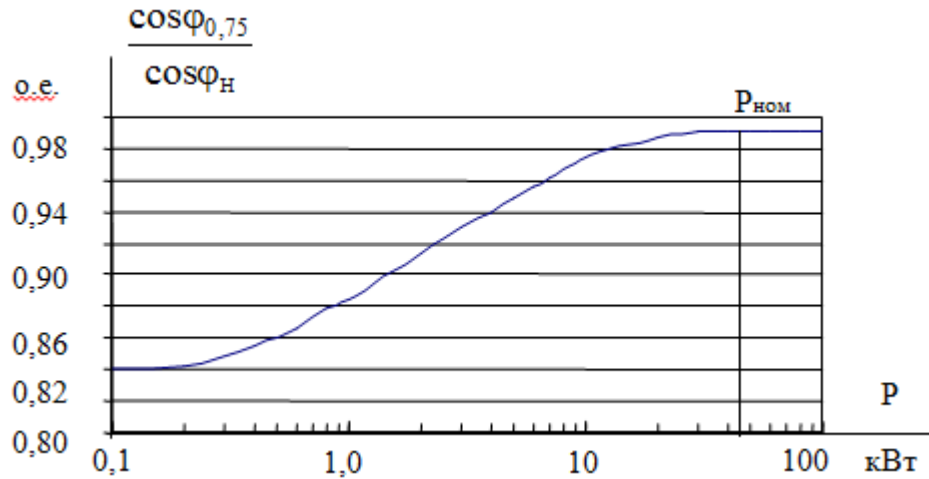


Рисунок 8. Зависимость $\cos\varphi_{0,75}/\cos\varphi_H$ от мощности асинхронных двигателей

Из формулы Клосса следует соотношение для расчета критического скольжения:

$$\begin{aligned}
S_{кр} &= S_H \cdot \frac{k_{\text{МАКС}} + \sqrt{k_{\text{МАКС}}^2 - [1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (k_{\text{МАКС}} - 1)]}}{1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (k_{\text{МАКС}} - 1)} = \\
&= 0,07 \cdot \frac{3 + \sqrt{3^2 - [1 - 0,8 \cdot 0,0167 \cdot 2 \cdot (3 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,0167 \cdot 0,8 \cdot (3 - 1)} = 0,1028 \text{ о.е.},
\end{aligned} \tag{2.8}$$

где в первом приближении коэффициент $\beta = 0,8$.

Предварительно для расчёта активных и индуктивных сопротивлений обмоток статора и ротора рассчитываются необходимые коэффициенты:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{16,098}{2 \cdot 7,9 \cdot 84,22} = 1,012; \tag{2.9}$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\Phi}^2 \cdot (1 - S_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\text{МАКС}} \cdot P_H} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,0167)}{2 \cdot 1,012 \cdot 3 \cdot 45 \cdot 10^3} = 0,522; \tag{2.10}$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_2' = \frac{A_1}{(\beta + 1/S_{\text{кр}}) \cdot C_1} = \frac{0,522}{(0,8 + 1/0,1028) \cdot 1,012} = 0,04903 \text{ Ом}; \quad (2.11)$$

Активное сопротивление обмотки статора определяется по следующему выражению:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,012 \cdot 0,04903 \cdot 0,8 = 0,0397 \text{ Ом}; \quad (2.12)$$

Параметр γ , для определения сопротивления короткого замыкания:

$$\gamma = \sqrt{(1/S_{\text{кр}}^2) - \beta^2} = \sqrt{(1/0,1028^2) - 0,8^2} = 9,697; \quad (2.13)$$

$$X_k = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 9,697 \cdot 1,012 \cdot 0,04903 = 0,48116 \text{ Ом}; \quad (2.14)$$

Тогда, индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, приближённо может быть рассчитано:

$$X_2' = 0,58 \cdot X_k / C_1 = 0,58 \cdot 0,48116 / 1,012 = 0,2757 \text{ Ом}; \quad (2.15)$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора:

$$X_1 = 0,42 \cdot X_k = 0,42 \cdot 0,48116 = 0,2021 \text{ Ом}; \quad (2.16)$$

Индуктивное сопротивление цепи намагничивания определяется через значение ЭДС обмотки статора:

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1H} \times \cos f_{1H} - R_1 \times I_{1H})^2 + (U_{1H} \times \sin f_{1H} - X_1 \times I_{1H})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \times 0,88 - 0,0397 \times 84,22)^2 +} \\ &\quad + \left(220 \times \sqrt{1 - 0,88^2} - 0,2021 \times 84,22 \right)^2 = 225,75 \text{ В}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Индуктивное сопротивление намагничивания:

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{225,75}{16,098} = 14,024 \text{ Ом}. \quad (2.18)$$

Для построения механической характеристики двигателя определим критический момент машины в двигательном режиме:

$$\begin{aligned}
M_{\text{кр}} &= \frac{m \cdot U_{1\Phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]} = \\
&= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314,159 \cdot 1,012 \cdot \left[0,0397 + \sqrt{0,0397^2 + (0,48116)^2} \right]} = \\
&= 439,8 \text{ Н} \cdot \text{м};
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Зададим диапазон изменения скольжения $S \in [-1, 1]$ с шагом 0,001, строим механическую характеристику асинхронного электродвигателя по формуле Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{кр}} (1 + a \cdot S_{\text{кр}})}{\frac{S_{\text{кр}}}{S} + \frac{S}{S_{\text{кр}}} + 2 \cdot a \cdot S_{\text{кр}}}; \tag{2.20}$$

где коэффициент a равен: $a = \frac{R_1}{R_2'} = \frac{0,0397}{0,04903} = 0,81;$

тогда расчётное выражение для механической характеристики примет следующий вид:

$$M(S) = \frac{953,306}{\frac{0,1028}{S} + \frac{S}{0,1028} + 0,168} \text{ Н} \cdot \text{м}; \tag{2.21}$$

Механическая характеристика асинхронного электродвигателя изображена на рисунке 9, характеристика 1. Она справедлива только в области номинальных скоростей.

Для учета изменения параметров асинхронной машины в момент пуска, вводим поправочные коэффициенты, которые необходимо умножить на величины активных и реактивных сопротивлений обмотки ротора:

$$R_2'(S) = R_2' \cdot f_1(S) = 0,04903 \cdot f_1(S) \text{ Ом}; \tag{2.22}$$

$$X_2'(S) = X_2' \cdot f_2(S) = 0,2757 \cdot f_2(S) \text{ Ом}; \tag{2.23}$$

Коэффициенты $f_1(S)$, $f_2(S)$ являются функциями скольжения. Эмпирические выражения для коэффициентов соответствующие данной модели асинхронного двигателя следующие:

$$f_1(S) = \frac{0.78 - 0.1 \cdot S^2 + 3 \cdot S^2 \cdot \sqrt{S}}{0.78 - 0.09 \cdot S^2 + S^2 \cdot \sqrt{S}}; \quad (2.24)$$

$$f_2(S) = 1 - \frac{0.04 \cdot S - 0.65 \cdot S^2 + 1.05 \cdot S^2 \cdot \sqrt{S}}{0.4 + 0.065 \cdot S^2 \cdot \sqrt{S}}. \quad (2.25)$$

При этом необходимо соблюдать условие, при котором величина активного сопротивления обмотки ротора при $S = 1$ имеет максимальное значение, а соответствующее реактивное сопротивление – минимальное, что обуславливается физическими явлениями увеличения активного сопротивления за счёт эффекта вытеснения тока на поверхность обмотки ротора и насыщения зубцовой зоны ротора соответственно.

Выражения, в которые последовательно подставляются $R'_2(S)$, $X'_2(S)$ также являются функциями скольжения. Механическая характеристика с учётом изменения сопротивлений обмотки ротора приведена на рисунке 9, характеристика 2.

По построенным механическим характеристикам проводим анализ рассчитанных данных, после чего сравним их с паспортными.

1) Момент номинальный:

$$M_{H(\text{паспорт})} = P_H / \omega_{\text{НОМ}} = 45 \cdot 10^3 / 308,9 = 145,68 \quad \text{Н} \cdot \text{м}; \quad (2.26)$$

то же значение, но по формуле Клосса:

$$\begin{aligned} M(S) &= \frac{953,306}{\frac{0,1028}{S_H} + \frac{S_H}{0,1028} + 0,168} = \frac{953,306}{\frac{0,1028}{0,01667} + \frac{0,01667}{0,1028} + 0,168} = \\ &= 145,807 \quad \text{Н} \cdot \text{м}; \end{aligned}$$

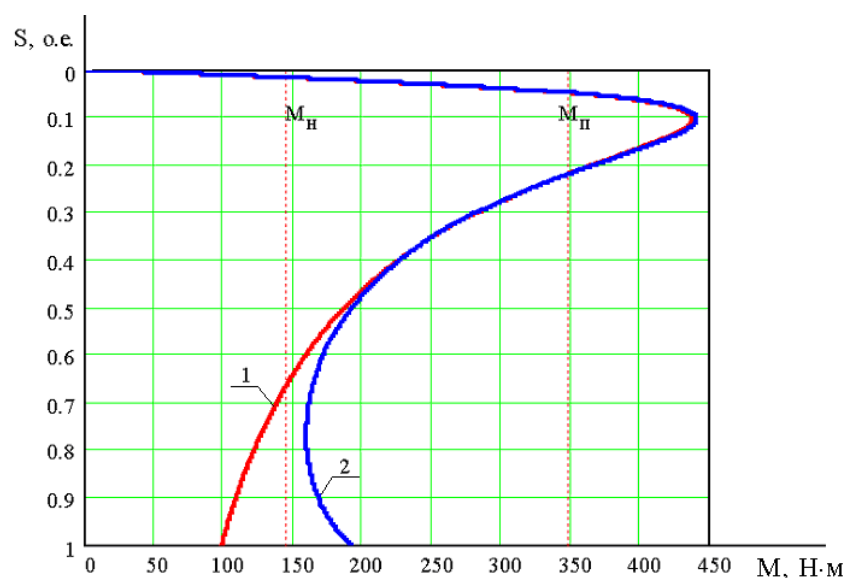


Рисунок 9. Механическая характеристика асинхронного электродвигателя

2) Момент критический:

$$M_{кр} = k_{макс} \cdot M_{H(паспорт)} = 3 \cdot 145,68 = 437,04 \quad \text{Н} \cdot \text{м}; \quad (2.27)$$

3) Пусковой момент:

$$M_{пуск} = k_{п} \cdot M_{H(паспорт)} = 2,4 \cdot 145,68 = 349,63 \quad \text{Н} \cdot \text{м}; \quad (2.28)$$

то же значение, но для характеристики 1:

$$M_{пуск}|_{S=1} = 95,97 \quad \text{Н} \cdot \text{м};$$

для характеристики 2:

$$M_{пуск}|_{S=1} = 180,2 \quad \text{Н} \cdot \text{м};$$

Для построения электромеханических характеристик воспользуемся следующим выражением для приведённого тока обмотки ротора:

$$\begin{aligned} I_2(S) &= \frac{U_{1\Phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}} = \\ &= \frac{220}{\sqrt{\left(0,0397 + \frac{0,04903}{S}\right)^2 + (0,48116)^2}} \text{ А}; \end{aligned} \quad (2.29)$$

Предельное асимптотическое значение тока ротора по выражению:

$$\begin{aligned} I_{2\text{ПР}}' &= \frac{U_{1\Phi}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,0397^2 + (0,48116)^2}} \\ &= 458,84 \text{ А;} \end{aligned} \quad (2.30)$$

Критическое значение тока ротора:

$$I_{2\text{КР}}' = U_{1\Phi} / (X_1 + X_2') = 220 / (0,48116) = 460,42 \text{ А;} \quad (2.31)$$

Данное значение соответствует следующей величине скольжения:

$$S_{2\text{КР}}' = -R_2' / R_1 = -0,04903 / 0,0397 = -1,2351 \text{ о.е.;} \quad (2.32)$$

Для построения электромеханической характеристики тока обмотки статора воспользуемся следующим выражением:

$$\begin{aligned} I_1(S) &= \sqrt{I_0^2 + \left(1 + 2 \cdot \alpha \cdot \sqrt{1 - a^2 \cdot S_{\text{КР}}'^2}\right) \cdot [I_2'(S)]^2} = \\ &= \sqrt{16,098^2 + 0,07 \cdot [I_2'(S)]^2} \text{ А;} \end{aligned} \quad (2.33)$$

где коэффициент $\alpha = I_0 / I_{2\text{ПР}}' = 16,098 / 458,84 = 0,0351$.

Задаваясь диапазоном изменения скольжения $S \in [-2, 1]$ с шагом 0,001, строим электромеханические характеристики асинхронного электродвигателя по формулам для токов обмоток статора и ротора. Электромеханические характеристики двигателя приведены на рисунке 10.

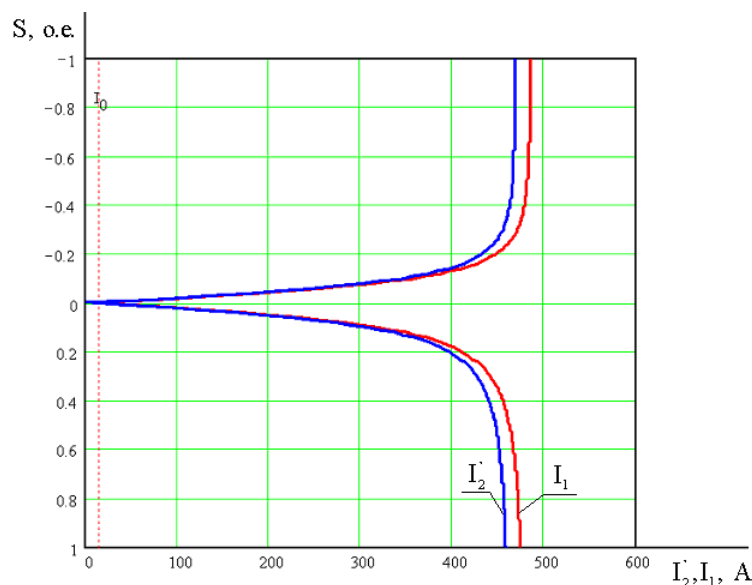


Рисунок 10. Электромеханические характеристики асинхронного электродвигателя

3. МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКО-ЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

3.1 Уравнения асинхронной машины в системе относительных единиц

Введем относительную систему единиц, приняв в качестве базовых:

Амплитуда мгновенного значения номинального фазного напряжения[5]:

$$U_B = \sqrt{2} \cdot U_{1\Phi} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311,13 \text{ В};$$

Амплитуда мгновенного значения номинального фазного тока:

$$I_B = \sqrt{2} \cdot I_{1\Phi} = \sqrt{2} \cdot 84,22 = 119,1 \text{ В};$$

Сопротивление:

$$R_B = \frac{U_B}{I_B} = \frac{311,13}{119,1} = 2,6123 \text{ Ом};$$

Номинальная угловая частота питающего напряжения двигателя в его номинальном режиме:

$$\omega_B = 2 \cdot \pi \cdot f_c = 2 \cdot 3,14159 \cdot 50 = 314,159 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

Потокоцепление:

$$\Psi_B = \frac{U_B}{\omega_B} = \frac{311,13}{314} = 0,99 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}};$$

Электромагнитный момент:

$$M_B = \frac{3}{2} p \frac{U_B \cdot I_B}{\omega_B} = \frac{3}{2} \cdot \frac{311,13 \cdot 119,1}{314} = 176,93 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}};$$

Время:

$$t_B = \frac{1}{\omega_B} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00318 \text{ с}.$$

Так как в дальнейшем будут использоваться в основном уравнения в относительной системе единиц (в безразмерном виде), то в них обозначения то-

ков, напряжений, потокосцеплений, сопротивлений оставим прежними. Чтобы записать векторное уравнение (3.17) в безразмерном виде, разделим его на U_B . С учетом (3.12), (3.13) в относительных единицах получаем[6]:

$$\left. \begin{aligned} \vec{U}_1 &= \vec{I}_1 \cdot r_1 + \frac{d\vec{\Psi}_1}{d\tau} + jv_{KC} \cdot \vec{\Psi}_1; & \vec{\Psi}_1 &= x_1 \cdot \vec{I}_1 + x_m \cdot \vec{I}_2; \\ \vec{U}_2 &= \vec{I}_2 \cdot r_2 + \frac{d\vec{\Psi}_2}{d\tau} + j(v_{KC} - v) \cdot \vec{\Psi}_2; & \vec{\Psi}_2 &= x_m \cdot \vec{I}_1 + x_2 \cdot \vec{I}_2, \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

где $v_{KC} = \frac{\omega_{KC}}{\omega_B}$, $v = \frac{\omega_r}{\omega_B}$ – относительные скорость вращения системы

координат и электрическая скорость вала двигателя. В этом уравнении сопротивления r_1 и r_2 представлены также в относительных единицах. При отсутствии питания со стороны ротора в (3.25) следует принять $\vec{U}_2 = 0$.

Аналогично уравнение (3.19) в относительных единицах запишется в виде:

$$\left. \begin{aligned} \vec{U}_1 &= r_1 \cdot \vec{I}_1 + \frac{d}{d\tau} (x_1 \cdot \vec{I}_1 + x_m \cdot \vec{I}_2) + jv_{KC} (x_1 \cdot \vec{I}_1 + x_m \cdot \vec{I}_2); \\ \vec{U}_2 &= r_2 \cdot \vec{I}_2 + \frac{d}{d\tau} (x_m \cdot \vec{I}_1 + x_2 \cdot \vec{I}_2) + j(v_{KC} - v_r) (x_m \cdot \vec{I}_1 + x_2 \cdot \vec{I}_2), \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

где $x_1 = \frac{\omega_B \cdot L_1}{R_B}$; $x_2 = \frac{\omega_B \cdot L_2}{R_B}$; $x_m = \frac{\omega_B \cdot L_m}{R_B}$ – индуктивные сопротивления

обмоток двигателя в относительных единицах.

Уравнения для вращающего момента двигателя в относительных единицах получим после деления (3.22), (3.23) на M_B :

$$\left. \begin{aligned} \vec{\mu} &= \vec{\Psi}_1 \times \vec{I}_1; & \mu &= \text{Im} \left[\vec{I}_1 \cdot \vec{\Psi}_1^* \right] = (\psi_{1x} \cdot i_{1y} - \psi_{1y} \cdot i_{1x}); \\ \vec{\mu} &= x_m \cdot \left[\vec{I}_2 \times \vec{I}_1 \right]; & \mu &= x_m \cdot \text{Im} \left[\vec{I}_1 \cdot \vec{I}_2^* \right] = x_m (i_{2x} \cdot i_{1y} - i_{1x} \cdot i_{2y}). \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

Используя уравнения связи между векторами потокосцеплений и токов (3.25), момент можно выразить через любую пару векторов $\vec{I}_1, \vec{I}_2, \vec{\Psi}_1, \vec{\Psi}_2$ и получить дополнительно соотношения:

$$\mu = \frac{x_m}{x_2} \cdot \text{Im}[\dot{I}_1 * \bar{\Psi}_2] \quad \mu = \frac{x_m}{x_1 \cdot x_2 \cdot \sigma} \cdot \text{Im}[\bar{\Psi}_1 * \bar{\Psi}_2], \quad (3.28)$$

где $\sigma = 1 - \frac{x_m^2}{x_1 \cdot x_2}$ – коэффициент рассеяния.

Уравнение движения двигателя в относительных единицах получим, разделив (3.24) на M_B :

$$\mu - \mu_c = H \cdot \frac{dv}{d\tau}, \quad (3.29)$$

где $H = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_B^2}{M_B \cdot p}$ – эквивалент момента инерции в относительных едини-

цах.

Уравнения асинхронной машины с короткозамкнутым ротором (АКЗ) получаются из (3.25), если обмотки ротора замкнуть накоротко. Соответственно следует положить $\vec{U}_2 = 0$.

Для построения модели асинхронного двигателя необходимо привести рассчитанные основные параметры машины к системе относительных единиц.

Скорость вращения системы координат [5]:

$$v_{KC} = \frac{\omega_{KC}}{\omega_B} = 1;$$

Скорость вращения ротора:

$$v = \frac{\omega_r}{\omega_B} = \frac{2950}{3000} = 0.9833;$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$r_1 = \frac{R_1}{R_B} = \frac{0,09599}{2,6123} = 0,0368;$$

Активное сопротивление обмотки ротора:

$$r_2 = \frac{R_2}{R_B} = \frac{0,04742}{2,6123} = 0,01815;$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора:

$$x_1 = \frac{X_1 + X_\mu}{R_B} = \frac{0,1745 + 13,698}{2,6123} = 5,1305;$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора:

$$x_2 = \frac{X_2 + X_\mu}{R_B} = \frac{0,2381 + 13,698}{2,6123} = 5,3348;$$

Индуктивное сопротивление цепи намагничивания:

$$x_m = \frac{X_m}{R_B} = \frac{13,698}{2,6123} = 5,2437;$$

Момент инерции:

$$H = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_B^2}{M_B \cdot p} = \frac{0,15 \cdot 314,159^2}{176,93 \cdot 1} = 83,676;$$

Для построения структурной модели асинхронного электродвигателя перепишем систему уравнений (3.25) в виде:

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \left(r_1 + r_2 \left(\frac{x_m}{x_2} \right)^2 \right) \dot{\bar{I}}_1 + \left(x_1 - \frac{x_m^2}{x_2} \right) \frac{d\dot{\bar{I}}_1}{d\tau} + jv_{KC} \left(x_1 - \frac{x_m^2}{x_2} \right) \dot{\bar{I}}_1 - \frac{x_m \cdot r_2}{x_2^2} \bar{\Psi}_2 + j \frac{x_m}{x_2} v_r \bar{\Psi}_2, \\ 0 &= - \frac{x_m \cdot r_2}{x_2} \dot{\bar{I}}_1 + \frac{r_2}{x_2} \bar{\Psi}_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{d\tau} + j(v_{KC} - v_r) \bar{\Psi}_2 \end{aligned}$$

Обозначим следующие безразмерные коэффициенты:

$$r = (r_1 + k_2^2 r_2), \quad x_1' = \left(x_1 - \frac{x_m^2}{x_2} \right), \quad k_2 = \frac{x_m}{x_2}, \quad T_2 = \frac{x_2}{r_2}.$$

Для построения модели определим величины безразмерных коэффициентов:

$$k_2 = \frac{x_m}{x_2} = \frac{5,2437}{5,3348} = 0,979;$$

$$T_2 = \frac{x_2}{r_2} = \frac{5,3348}{0,01815} = 270,947;$$

$$x_1' = \left(x_1 - \frac{x_m^2}{x_2} \right) = \left(5,1305 - \frac{5,2437^2}{5,3348} \right) = 0,181;$$

$$r = (r_1 + k_2^2 r_2) = (0,0368 + 0,979^2 \cdot 0,01815) = 0,03319;$$

$$T_1 = \frac{x_1}{r} = \frac{0,181}{0,03319} = 5,445.$$

Запишем данную систему уравнений в операторной форме в подвижной системе координат, вращающейся со скоростью v_{KC} . Для этого разложим векторные величины на проекции по вещественной и мнимой осям x и jy соответственно и переведем систему в операторную плоскость, произведем замену:

$p = \frac{d}{dt}$, где p – оператор Лапласа.

$$\begin{aligned} U_{1x} &= r \left(1 + \frac{x_1}{r} p \right) I_{1x} - x_1 v_{KC} I_{1y} - \frac{k_2}{T_2} \Psi_{2x} - k_2 v_r \Psi_{2y} \\ U_{1y} &= r \left(1 + \frac{x_1}{r} p \right) I_{1y} + x_1 v_{KC} I_{1x} - \frac{k_2}{T_2} \Psi_{2y} + k_2 v_r \Psi_{2x} \\ 0 &= -k_2 r_2 I_{1x} + \frac{1}{T_2} \Psi_{2x} + p \Psi_{2x} - (v_{KC} - v_r) \Psi_{2y} \\ 0 &= -k_2 r_2 I_{1y} + \frac{1}{T_2} \Psi_{2y} + p \Psi_{2y} + (v_{KC} - v_r) \Psi_{2x} \end{aligned} \quad (3.30)$$

Запишем уравнение движения электропривода (3.29) и выражение для момента (3.28) во вращающейся системе координат в операторной форме:

$$H \cdot p \cdot v_r = \mu - \mu_c, \quad (3.31)$$

$$\mu = k_2 (\Psi_{2x} \cdot I_{1y} - \Psi_{2y} \cdot I_{1x}). \quad (3.32)$$

Итоговая система уравнений для построения математической модели асинхронного электропривода во вращающейся системе координат:

$$\left\{ \begin{array}{l} r(1 + T_1 p) I_{1x} = U_{1x} + x_1' v_{KC} I_{1y} + \frac{k_2}{T_2} \Psi_{2x} + k_2 v_r \Psi_{2y} \\ r(1 + T_1 p) I_{1y} = U_{1y} - x_1' v_{KC} I_{1x} + \frac{k_2}{T_2} \Psi_{2y} - k_2 v_r \Psi_{2x} \\ \frac{(1 + T_2 p)}{T_2} \Psi_{2x} = k_2 r_2 I_{1x} + (v_{KC} - v_r) \Psi_{2y} \\ \frac{(1 + T_2 p)}{T_2} \Psi_{2y} = k_2 r_2 I_{1y} - (v_{KC} - v_r) \Psi_{2x} \\ H \cdot p \cdot v_r = \mu - \mu_c \\ \mu = k_2 (\Psi_{2x} \cdot I_{1y} - \Psi_{2y} \cdot I_{1x}) \end{array} \right. \quad (3.33)$$

где $T_1 = \frac{x_1'}{r}$.

На рисунке 14 приведена структурная схема линеаризованной модели асинхронного электродвигателя, составленная по системе уравнений (3.33).

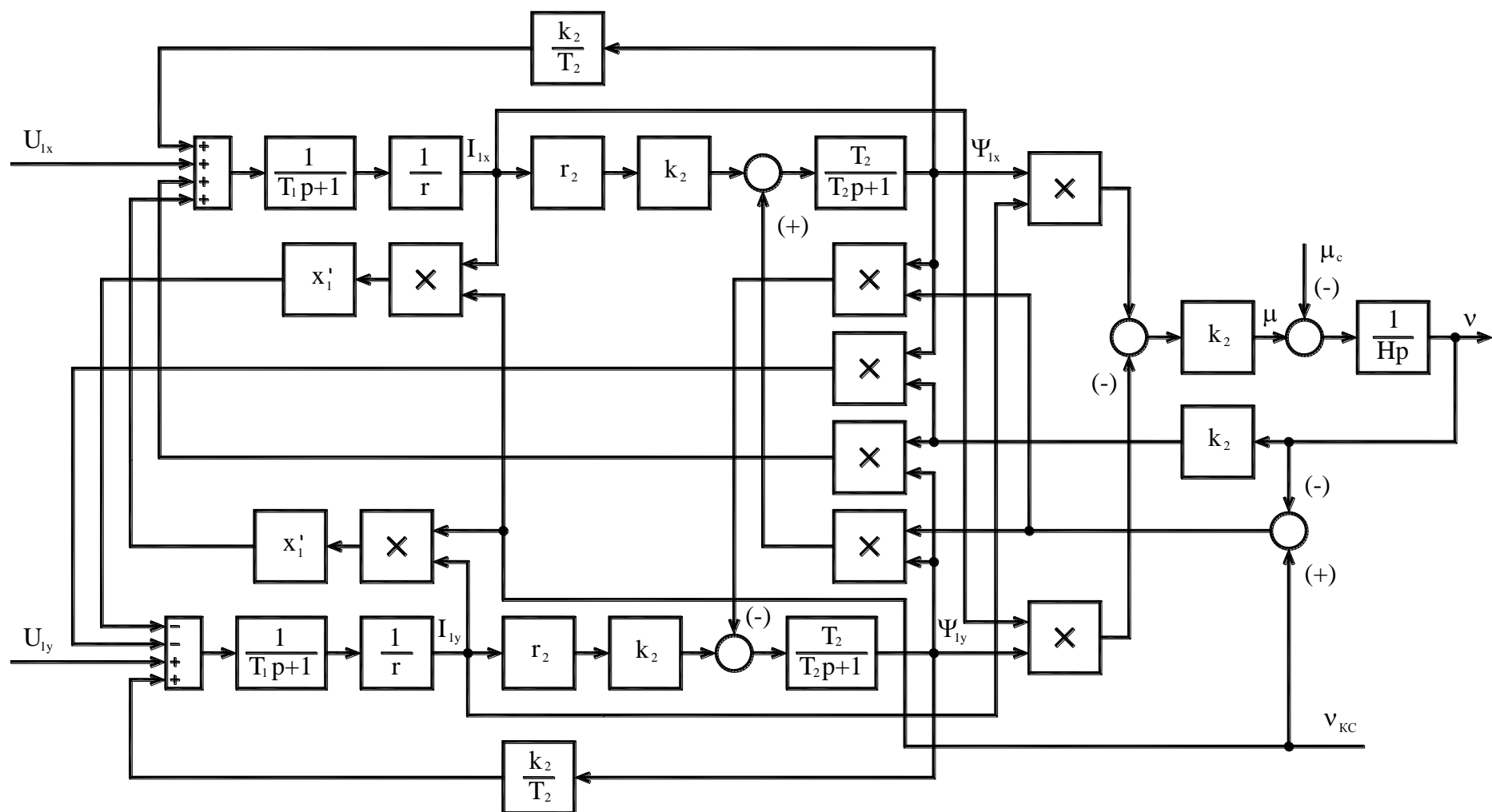


Рисунок 14. Структурная схема модели асинхронного электродвигателя во вращающейся системе координат

3.2 Имитационная модель линеаризованной модели асинхронного электродвигателя в программной среде MATLAB

В данной работе моделирование асинхронного электродвигателя и электропривода, осуществляется с помощью системы визуального моделирования SIMULINK, входящей в универсальный программный пакет MATLAB [7].

Основное достоинство пакета MATLAB является то, что для работы пользователю достаточно узнать о нем ровно столько, сколько требует решаемая задача. Если же решаемая задача требует создание каких-либо специальных инструментов, MATLAB предоставляет в распоряжение пользователя практический универсальный язык объектно-ориентированного программирования в сочетании с различными средствами отладки создаваемых программ. Структура данного пакета позволяет сочетать основные подходы к созданию модели: аналитический и имитационный. Основное место среди наборов инструментов занимает система визуального моделирования SIMULINK.

В качестве элементов для построения моделей по средствам SIMULINK используются модули, находящиеся в соответствующей библиотеке. Еще одно достоинство библиотеки SIMULINK заключается в том, что она является открытой системой: состав библиотеки может быть пополнен за счет разработки собственных блоков. Библиотека блоков SIMULINK представляет набор визуальных объектов, используя которые можно собирать, как из кубиков, произвольную конструкцию. Практически для всех блоков существует возможность индивидуальной настройки: можно изменить как внутренние параметры блоков), так и внешнее оформление. На порядок соединения блоков не накладывается никаких ограничений, но необходимо соблюдать ряд правил, обусловленных в основном логикой работы самой модели, а не специальными требованиями SIMULINK.

3.3 Динамические характеристики асинхронного электродвигателя при прямом пуске

В данной модели в первом приближении используется вентиляторный момент нагрузки, которому соответствует квадратичная зависимость момента нагрузки от скорости вращения вала двигателя[8]:

$$M_c = \frac{M_H}{\omega_H^2} \cdot \omega^2 \quad \text{Н} \cdot \text{м}, \quad (3.34)$$

В системе относительных единиц:

$$\mu_c = \frac{M_H \cdot \omega_B^2}{\omega_H^2 \cdot M_B} \cdot v^2 = \frac{145,68 \cdot 314,159^2}{308,92^2 \cdot 176,93} \cdot v^2 = 0,8515 \cdot v^2 \quad \text{о.е.}$$

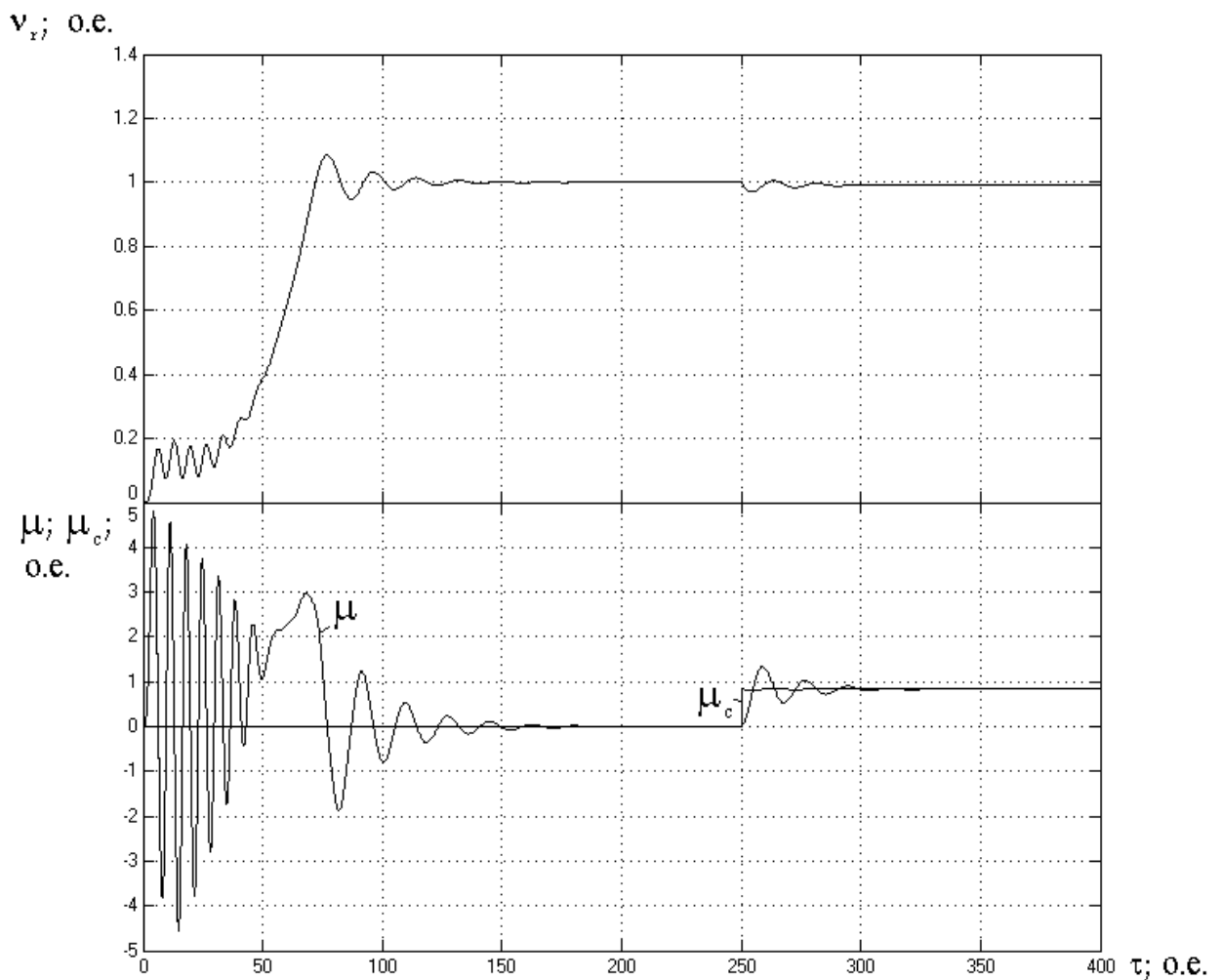


Рисунок 16. Временные характеристики $v_r = f(\tau)$, $\mu = f(\tau)$, при пуске АД на холостом ходу с набросом нагрузки

Основные показатели качества для характеристики скорости $v_r = f(\tau)$:

Перерегулирование: $\sigma = 8\%$,

Колебательность: $n = 1$,

Время регулирования: $t_p = 87 \cdot t_B = 87/314,159 = 0,277$ с,

Установившиеся значение: $\omega_{уст} = 1 \cdot \omega_B = 1 \cdot 314,159 = 314,159 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$,

после наброса нагрузки – $\omega_{уст1} = 0,983 \cdot \omega_B = 0,983 \cdot 314,159 = 308,92 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$

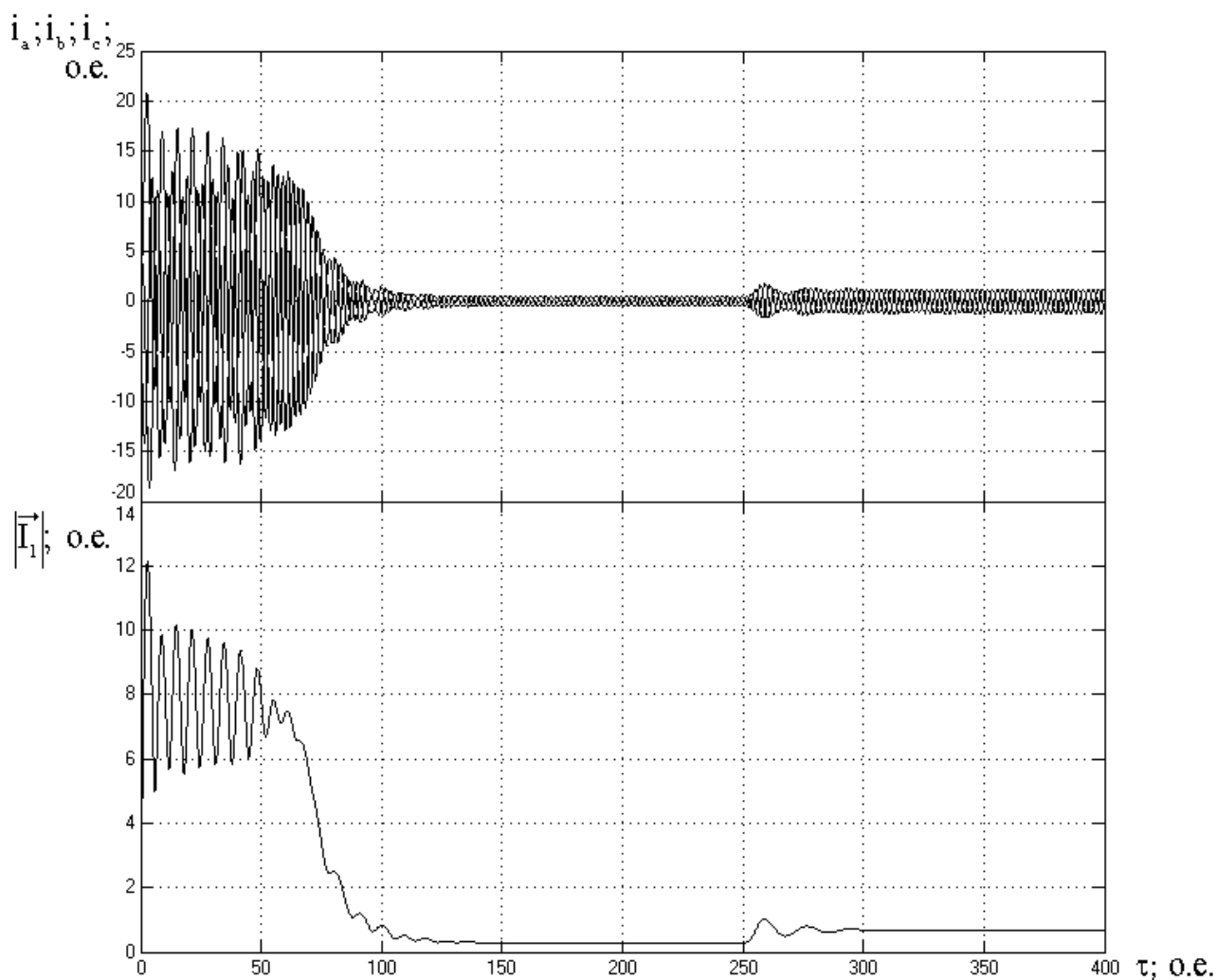


Рисунок 17. Временные характеристики $i_a = f(\tau)$; $i_b = f(\tau)$; $i_c = f(\tau)$; $|\vec{I}_1| = f(\tau)$

при пуске АД на холостом ходу с последующим набросом нагрузки

Установившиеся действующее значение тока обмотки статора:

На холостом ходу: $I_1 = 0,3 \cdot I_B = 0,3 \cdot 119,1 = 35,73 \text{ А}$,

Под нагрузкой: $I_1 = 0,7 \cdot I_B = 0,7 \cdot 119,1 = 83,37 \text{ А}$

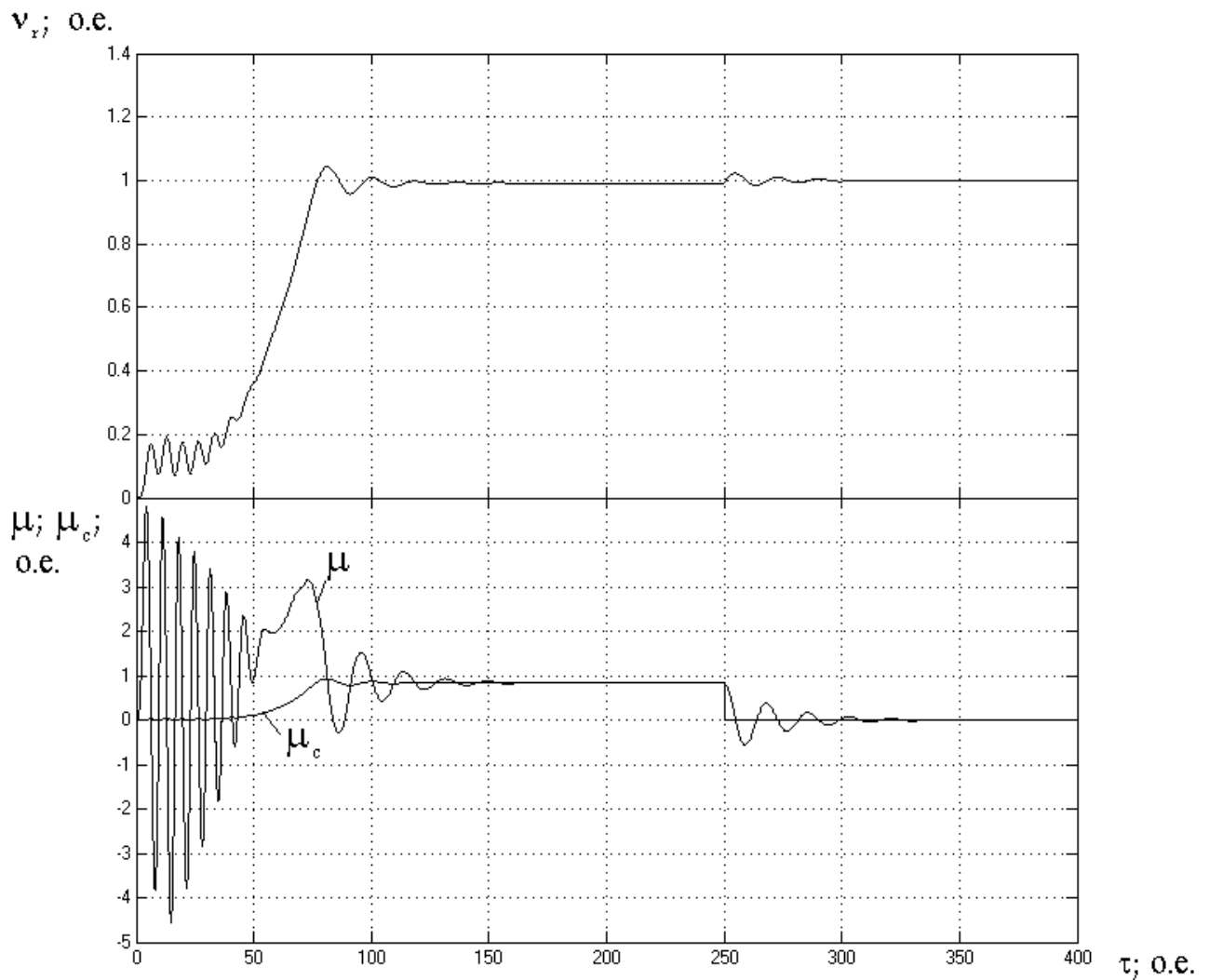


Рисунок 18. Временные характеристики $v_r = f(\tau)$, $\mu = f(\tau)$, при пуске АД
под нагрузкой с её последующим сбросом

Основные показатели для характеристики скорости $v_r = f(\tau)$

Перерегулирование: $\sigma = 4,6 \%$,

Колебательность: $n = 0$,

Время регулирования: $t_p = 75 \cdot t_B = 75/314,159 = 0,239 \text{ с}$,

Установившиеся значение:

$$\omega_{уст} = 0,983 \cdot \omega_B = 0,983 \cdot 314,159 = 308,92 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

после наброса нагрузки – $\omega_{уст1} = 1 \cdot \omega_B = 1 \cdot 314,159 = 314,159 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$

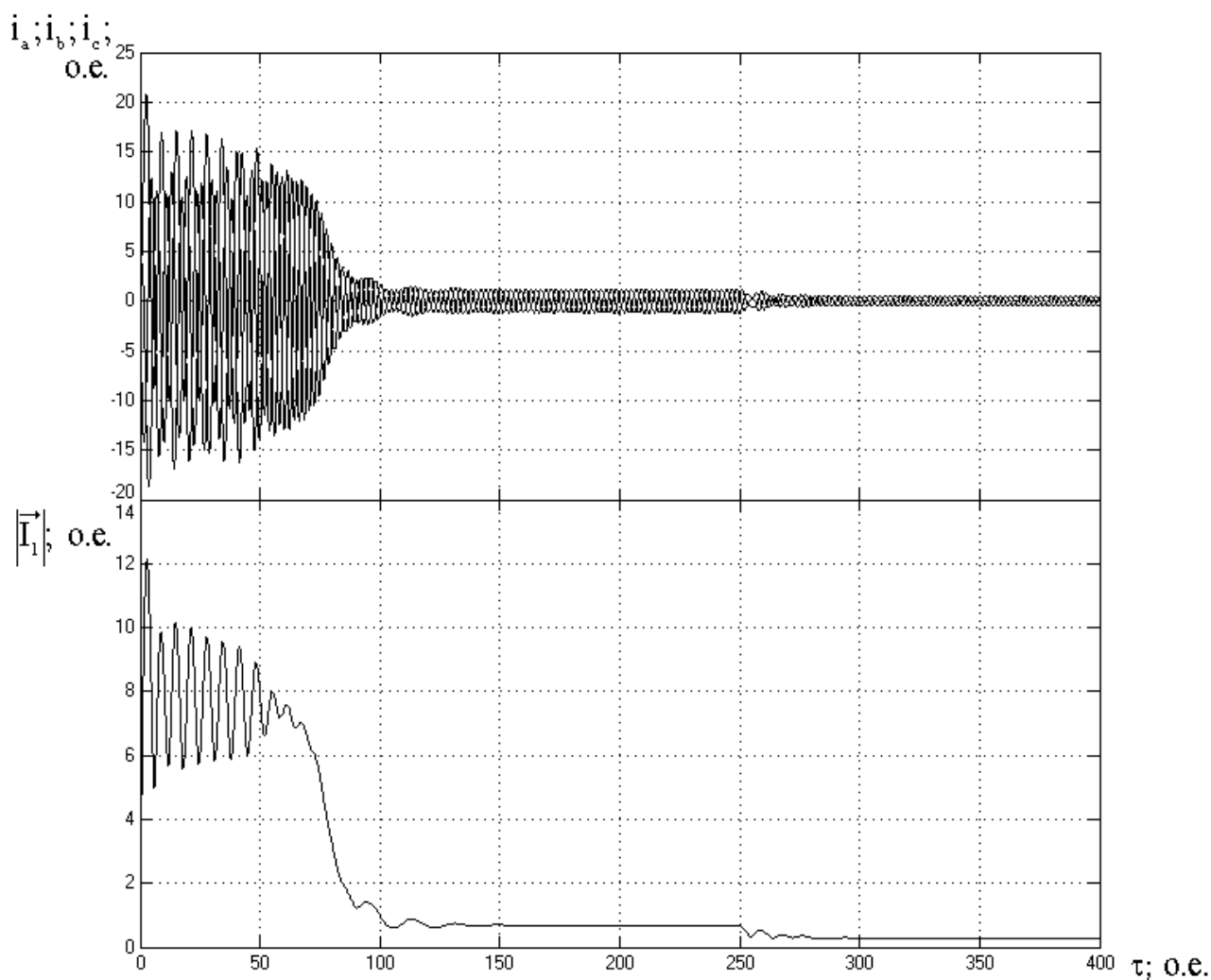


Рисунок 19. Временные характеристики $i_a = f(\tau)$; $i_b = f(\tau)$; $i_c = f(\tau)$; $|\vec{I}_1| = f(\tau)$

при пуске АД под нагрузкой с её последующим сбросом

Установившиеся действующее значение тока обмотки статора:

Под нагрузкой: $I_1 = 0,7 \cdot I_B = 0,7 \cdot 119,1 = 83,37 \text{ А}$,

На холостом ходу: $I_1 = 0,3 \cdot I_B = 0,3 \cdot 119,1 = 35,73 \text{ А}$,

Вид переходных процессов при прямом пуске асинхронного электродвигателя показывает наличие колебательной составляющей в кривой электромагнитного момента изменяющейся в пределах $\pm 5 \cdot M_B$ с частотой 43 Гц и затухающей по мере разгона двигателя. При достижении динамической

характеристикой критического значения, двигатель имеет максимальное ускорение. Пуск под нагрузкой сопровождается меньшим значением перерегулирования скорости. По достижении скорости заданного значения, момент электродвигателя стремится уравновесить величину нагрузки. Наброс нагрузки приводит к соответствующей просадке скорости. Мгновенные значения токов обмоток статора во время разгона двигателя достигают значения $\pm 20 \cdot I_{\text{н}}$, по окончании времени разгона также уменьшаются до номинальных. В итоге прямой пуск асинхронного двигателя не позволяет получить удовлетворительных переходных характеристик при условии возможного изменения нагрузки что приводит к снижению скорости и наличия колебательных составляющих в характеристике момента. При этом характеристики токов обмоток статора в момент разгона находятся на граничном допустимом значении.

4. ВЫБОР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

4.1 Преобразователь частоты FDU 40-090 СЕВ

Шведская фирма Emotron АВ разработала специализированную насосно-вентиляторную серию преобразователей частоты. Такая стратегия привела к введению специализированных возможностей преобразователя, например, программного монитора нагрузки, позволяющего отслеживать режимы «сухого хода», кавитации или работы на закрытую заслонку. Наличие дополнительной платы позволяет управлять дополнительно насосами, включая и выключая их по мере необходимости. Такая работа превращает преобразователь практически в контроллер насосной станции. В итоге в соответствии с питающей сетью, мощностью двигателя и характером нагрузки выбран преобразователь FDU 40-090 СЕВ шведской фирмы Emotron, представленный на рисунке 20 [9].



Рисунок 20. Преобразователь частоты Emotron FDU 40-090 CEB

Основные специализированные функции:

- Пуск вращающегося двигателя,
- Встроенный ПИД регулятор,
- Преодоление провалов напряжения,
- Встроенный монитор нагрузки,
- Автоматический потенциометр,
- Двойное время разгона / замедления,
- Использование макросов,
- Возможность управления 7 насосами одновременно.

Основные характеристики:

- Напряжение питания: 3x380-415 В +10%/-15%,
- Номинальный выходной ток: 90 А,
- Ограничение тока, 120 с.: 108 А,
- Входной ток: 85 А,
- Входная частота: 50 / 60 Гц,
- Выходная частота: 0-400 Гц,
- КПД при номинальной мощности: 98 %,
- Потери при $f_1 = 1,5$ кГц: 900 Вт,
- Степень защиты IP54.

Более подробная информация приведена в руководстве по эксплуатации [2, стр. 73]

5. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ НАСОСА

5.1 Регулирование скорости электропривода с помощью

законов $U_{1\phi} / f_1 = \text{const}$, $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$

В электроприводах со скалярным управлением для регулирования или стабилизации скорости используются различные соотношения между частотой и напряжением. Выбор конкретного соотношения зависит характера момента нагрузки. Для двигателя типа MMG225M управляемого от преобразователя частоты FDU 40-090 СЕВ, по паспортным данным, параметрам схемы замещения рассчитаем и построим электромеханические и механические характеристики при питании его от статического преобразователя частоты по следующим законам управления[10]:

$U_{1\phi} / f_1 = \text{const}$; $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$, для частот $f_1 = 50; 40; 25; 10$ Гц.

Таблица 3. Требуемые для расчета параметры схемы замещения

Заданные величины	Условное обозначение	Единица измерения	Численное значение
Активное сопротивление обмотки статора	R_1	Ом	0,0397
Активное сопротивление обмотки ротора	R_2	Ом	0,04903
Индуктивное сопротивление статорной обмотки	X_1	Ом	0,2021
Индуктивное сопротивление роторной обмотки	X_2	Ом	0,2757
Индуктивное сопротивление намагничивания	$X_{\mu H}$	Ом	14,024

Для закона управления $U_{1\Phi}/f_1 = \text{const}$ асинхронным двигателем произведём расчёт электромеханических и механических характеристик при частотах 50; 40; 25; 10 Гц.

Определим значения относительных частот, напряжений и синхронных скоростей:

$$f_{1*} = \frac{f_{1j}}{f_{1H}} = \frac{\{50; 40; 25; 10\}}{50} = \{1; 0,8; 0,5; 0,2\} \text{ о.е.}; \quad (5.1)$$

$$U_{1j} = U_{1\Phi} \cdot f_{1*} = 220 \cdot \{1; 0,8; 0,5; 0,2\} = \{220; 176; 110; 44\} \text{ В}; \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \omega_{0j} &= \omega_{0H} \cdot f_{1*} = 78,54 \cdot \{1; 0,8; 0,5; 0,2\} = \\ &= \{78,54; 62,83; 39,27; 15,708\} \text{ рад/с}; \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$S_j(\omega) = \frac{\omega_{0j} - \omega}{\omega_{0j}}; \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_{2j}(\omega) &= \frac{U_{1j}}{\sqrt{X_{кH}^2 \cdot f_{1H}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2}{S_j(\omega)}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{S_j(\omega) \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}}\right)^2}} = \\ &= \frac{U_{1j}}{\sqrt{0,48116^2 f_{1*}^2 + \left(0,0397 + \frac{0,04903}{S_j(\omega)}\right)^2 + \left(\frac{0,0397 \cdot 0,04903}{S_j(\omega) \cdot 14,024 \cdot f_{1*}}\right)^2}}; \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} I_{1j}(\omega) &= \sqrt{I_0^2 + \Gamma_{2j}^2(\omega) + 2 \cdot I_0 \cdot \Gamma_{2j}(\omega) \frac{X_{кH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{S_j(\omega)}\right)^2 + X_{кH}^2}}} = \\ &= \sqrt{14,024^2 + \Gamma_{2j}^2(\omega) + 2 \cdot 14,024 \cdot \Gamma_{2j}(\omega) \frac{0,48116}{\sqrt{\left(0,0397 + \frac{0,04903}{S_j(\omega)}\right)^2 + 0,48116^2}}} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Построенные характеристики для данного закона управления двигателем изображены на рисунке 21.

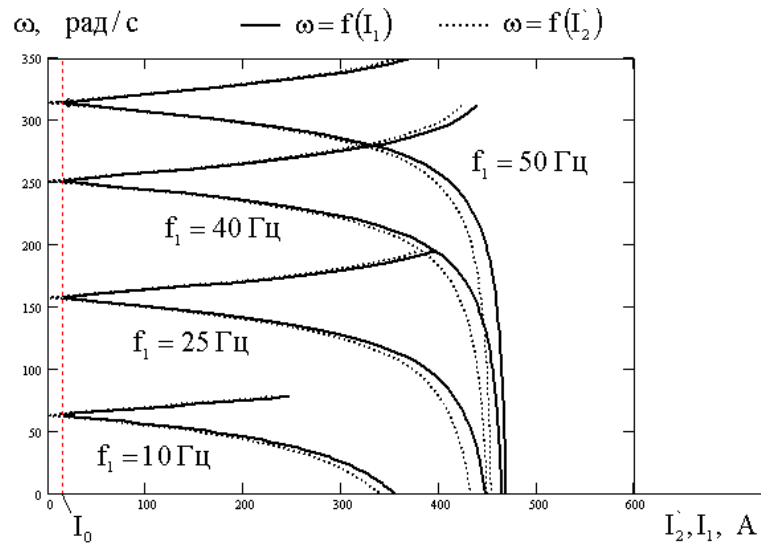


Рисунок 21. Электромеханические характеристики двигателя при законе регулирования скорости $U_{1\phi}/f_1 = \text{const}$

Для закона управления $U_{1\phi}/f_1^2 = \text{const}$ расчёт электромеханических характеристик тот же, с отличием:

$$U_{1j} = U_{1\phi} \cdot f_{1*}^2 = 220 \cdot \{1; 0,8; 0,5; 0,2\}^2 = \{220; 140,8; 55; 8,8\} \text{ В}; \quad (5.7)$$

Электромеханические характеристики для этого закона управления приведены на рисунке 22.

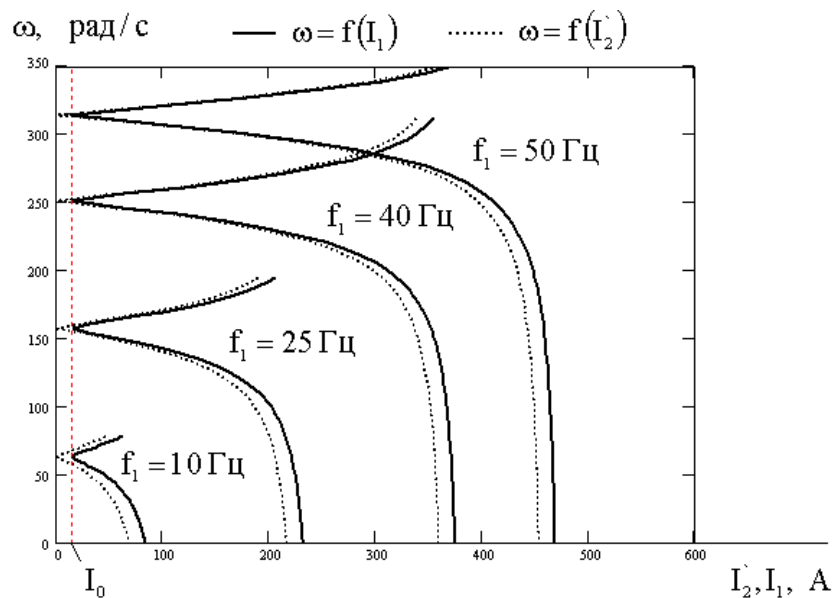


Рисунок 22. Электромеханические характеристики двигателя при законе регулирования скорости $U_{1\phi}/f_1^2 = \text{const}$

Для построения механических характеристик асинхронной машины при законах управления $U_{1\Phi}/f_1 = \text{const}$, $U_{1\Phi}/f_1^2 = \text{const}$ воспользуемся следующим выражением:

$$M_j(\omega) = \frac{3 \cdot (\Gamma_2(\omega))^2 \cdot R_2}{\omega_{0j} \cdot S_j(\omega)} = \frac{3 \cdot (\Gamma_2(\omega))^2 \cdot 0,04903}{\omega_{0j} \cdot S_j(\omega)}; \quad (5.8)$$

Расчёт механических характеристик двигателя последовательно является продолжением расчёта электромеханических характеристик. Теперь соответствующие для каждой характеристики значения $\Gamma_2(\omega)$, $S_j(\omega)$, ω_{0j} подставляются в выражение для характеристики момента. Механические характеристики двигателя при законах управления $U_{1\Phi}/f_1 = \text{const}$, $U_{1\Phi}/f_1^2 = \text{const}$ приведены на рисунках 23 и 24.

Произведём аналитический расчёт величин критических моментов для рассматриваемых законов управления асинхронной машиной по следующему выражению:

$$\begin{aligned} M_{\text{кр}j} &= \frac{3 \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_{0j} \cdot \left[R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2) \cdot \left(1 + \left(\frac{R_1}{X_{\mu\text{н}} \cdot f_{1*}} \right)^2} \right)} \right]} = \\ &= \frac{3 \cdot U_{1j}^2}{2 \cdot \omega_{0j} \cdot \left[0,0397 + \sqrt{(0,0397^2 + 0,48116^2 \cdot f_{1*}^2) \cdot \left(1 + \left(\frac{0,0397}{14,024 \cdot f_{1*}} \right)^2} \right)} \right]}; \end{aligned} \quad (5.9)$$

Для расчёта критического скольжения воспользуемся следующим выражением:

$$S_{\text{кр}j} = \frac{R_2}{\sqrt{\frac{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1*}^2}{1 + \left(\frac{R_1}{X_{\mu\text{н}} \cdot f_{1*}} \right)^2}}} = \frac{0,04903}{\sqrt{\frac{0,0397^2 + 0,48116^2 \cdot f_{1*}^2}{1 + \left(\frac{0,0397}{14,024 \cdot f_{1*}} \right)^2}}} \text{ о.е.}; \quad (5.10)$$

Результат расчёта критических моментов и скольжений для разных частот и законов управления сведён в таблицу 4.

Таблица 4. Результаты расчёта критического момента и скольжения

$f_{1j}, \text{Гц}$	$S_{\text{кр}j}, \text{о.е.}$	$M_{\text{кр}j} \text{ Н} \cdot \text{м}$		$M_{\text{кр}j} \text{ Н} \cdot \text{м с IR компенсации ей}$	
		$U_{1\Phi}/f_1 = \text{const}$	$U_{1\Phi}/f_1^2 = \text{const}$	$U_{1\Phi}/f_1 = \text{const}$	$U_{1\Phi}/f_1^2 = \text{const}$
50	0,102	445,119	445,119	549,222	549,222
40	0,128	436,008	279,045	549,619	352,169
25	0,202	409,899	102,475	549,694	138,15
10	0,474	322,775	12,911	545,889	22,336

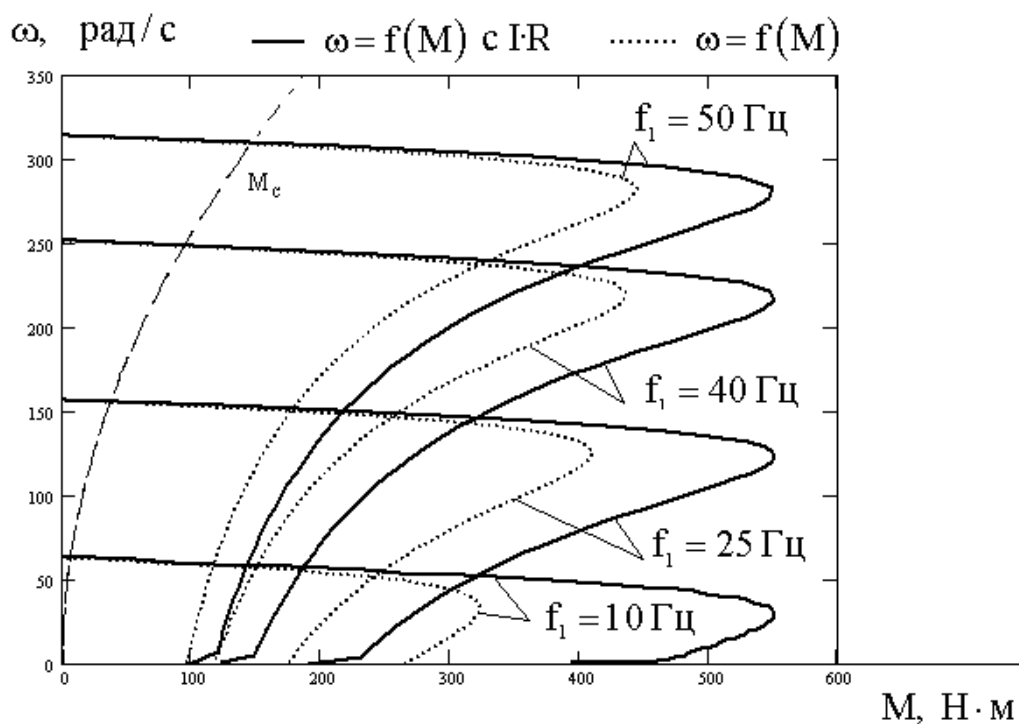


Рисунок 23. Механические характеристики двигателя при законе регулирования скорости $U_{1\Phi}/f_1 = \text{const}$

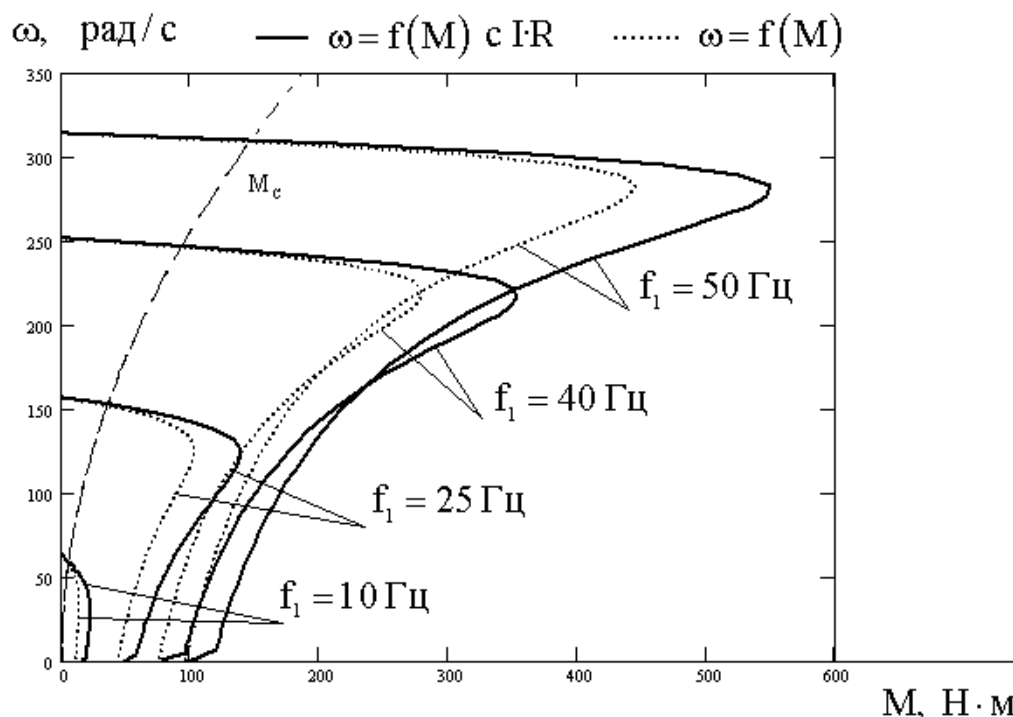


Рисунок 24. Механические характеристики двигателя при законе регулирования скорости $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$

5.2 Регулирование скорости электропривода с помощью

законов $U_{1\phi} / f_1 = \text{const}$, $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$ с $I \cdot R$ – компенсацией

Из построенных характеристик следует, что для данного двигателя при законе управления $U_{1\phi} / f_1 = \text{const}$ с уменьшением частоты питающей сети заметно влияние активного сопротивления обмотки статора. В результате критический момент на малых частотах падает. Для регулирования скорости двигателя с постоянным критическим моментом необходимо изменять напряжение по следующему закону $U_{1j} = U_{1\phi} \cdot f_{1*} + I_{1i} \cdot R_1$ (пропорциональное регулирование с $I \cdot R$ – компенсацией). Чтобы реализовать данную зависимость необходимо организовать положительную обратную связь по току с коэффициентом передачи $R_1 \cdot K_M$, где величина K_M характеризует степень компенсации падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора. При выборе $K_M = 1$ имеем полную компенсацию R_1 .

В общем виде расчёт электромеханических и механических характеристик не отличается от предыдущего. Однако при этом необходимо учесть положительную связь по току и постоянно корректировать величину U_{1j} . Характеристики с $I \cdot R$ – компенсацией были построены в программной среде Mathcad 2000. Текст программы расчёта характеристик приведён в приложении А.

Механические характеристики АД при законах регулирования скорости $U_{1\phi}/f_1 = \text{const}$, $U_{1\phi}/f_1^2 = \text{const}$ с $I \cdot R$ - компенсацией приведены на рисунках 22 и 23, электромеханические – на рисунках 25, 26

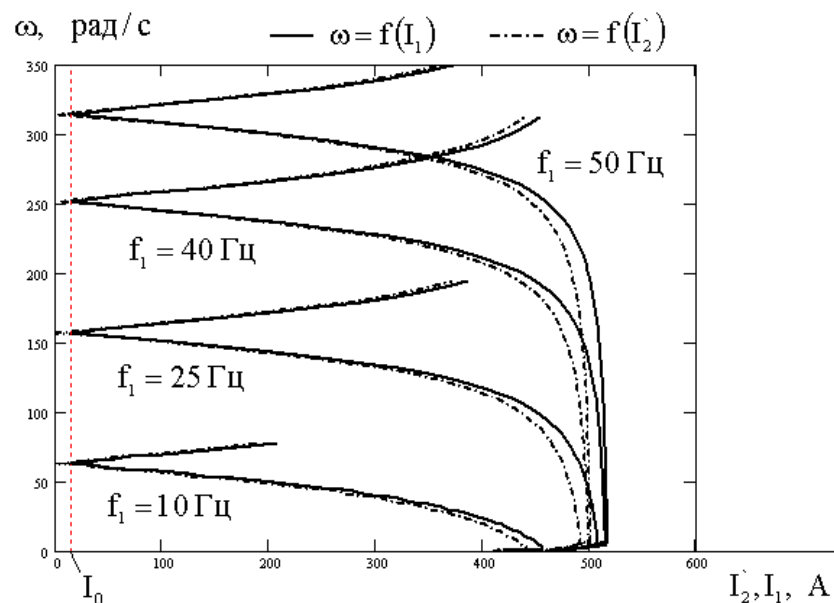


Рисунок 25. Электромеханические характеристики двигателя при законе регулирования скорости $U_{1\phi}/f_1 = \text{const}$ с $I \cdot R$ – компенсацией

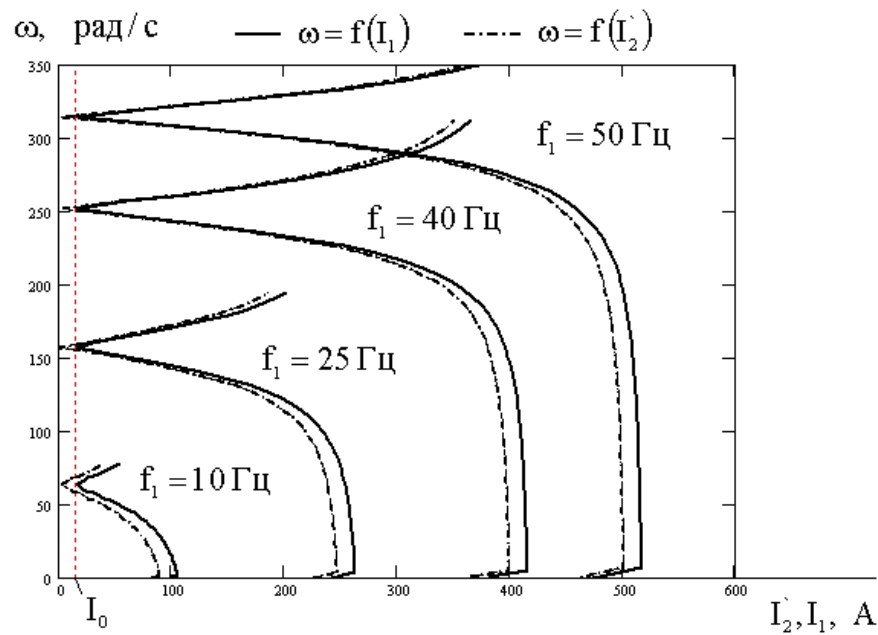


Рисунок 26. Электромеханические характеристики двигателя при законе регулирования скорости $U_{1\phi} / f_1^2 = \text{const}$ с $I \cdot R$ – компенсацией

Из построенных механических и электромеханических характеристик электропривода следует, что введение положительной обратной связи по току увеличивает значение максимального момента механических характеристик, однако одновременно ведёт к дополнительному увеличению напряжения в обмотке статора. Влияние дополнительного подмагничивания системы на малых скоростях двигателя опасно с точки зрения недопустимого теплового режима работы, однако при заданном малом диапазоне регулирования скорости данное замечание не является существенным. В области номинальных частот вращения присутствует незначительное повышение жёсткости механических характеристик.

6. МЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЭП

6.1 Кинематическая схема механизма

Кинематическая схема механизма приведена на рисунке 27.

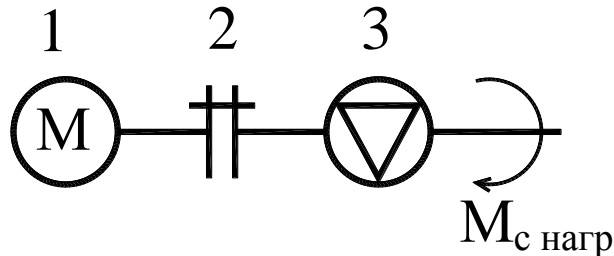


Рисунок 27. Кинематическая схема механизма

На рисунке приняты следующие обозначения:

- 1 – электродвигатель (М),
- 2 – муфта,
- 3 – насос.

6.2 Расчетная схема замещения механической системы

Из рисунка 27 следует, что кинематическая схема механической части электропривода насоса не является достаточно сложной. В общем случае она состоит из двух инерционных масс и соединяющих их упругой связи. Поэтому структуру механической системы электропривода насоса сведём к двухмассовой механической системе (ДМС). Расчетная схема замещения ДМС приведена на рисунке 28[11].

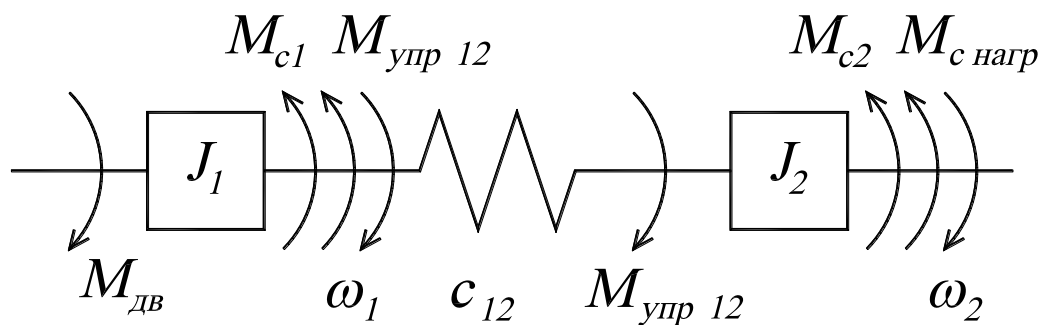


Рисунок 28. Расчетная схема замещения механической системы

Определим параметры структурной схемы механической части электропривода центробежного насоса. Они соответствуют двухмассовой расчётной схеме замещения.

Момент инерции ротора двигателя и жёстко с ним связанной полумуфты:

$$J_1 = 0,55 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент инерции насоса и жёстко с ним связанной второй полумуфты:

$$J_2 = 0,45 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Эквивалентная расчётная жёсткость механической связи между ротором двигателя и валом насосом:

$$C_{12} = 5060 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент сопротивления соответствующий работе насоса с номинальной частотой вращения на закрытую заслонку [6, стр. 569]:

$$M_0 = 80,1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент механических потерь асинхронного электродвигателя:

$$M_{c1} = 0,05 \cdot M_H = 0,05 \cdot 145,68 = 7,284 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент потерь насоса:

$$M_{c2} = \Delta M = 15 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Основную долю $M_{c \text{ нагр}}$ составляет нагрузка, пропорциональная квадрату скорости:

$$\begin{aligned} M_{c \text{ нагр}} &= \left(\frac{M_H - M_{c1} - \Delta M}{\omega_{\text{НОМ}}^2} \right) \cdot \omega^2 = \left(\frac{145,68 - 7,284 - 15}{308,9^2} \right) \cdot \omega^2 = \\ &= 0,0013 \cdot \omega^2 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned} \quad (6.1)$$

Определим общие параметры схемы. Соотношение масс:

$$\gamma = \frac{(J_1 + J_2)}{J_1} = \frac{0,55 + 0,45}{0,55} = 1,818. \quad (6.2)$$

Резонансная частота системы:

$$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{c_{12}(J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2}} = \sqrt{\frac{5060 \cdot (0,55 + 0,45)}{0,55 \cdot 0,45}} = 142,98 \text{ 1/с.} \quad (6.3)$$

Структурная схема ДМС в системе относительных единиц приведена на рисунке 29.

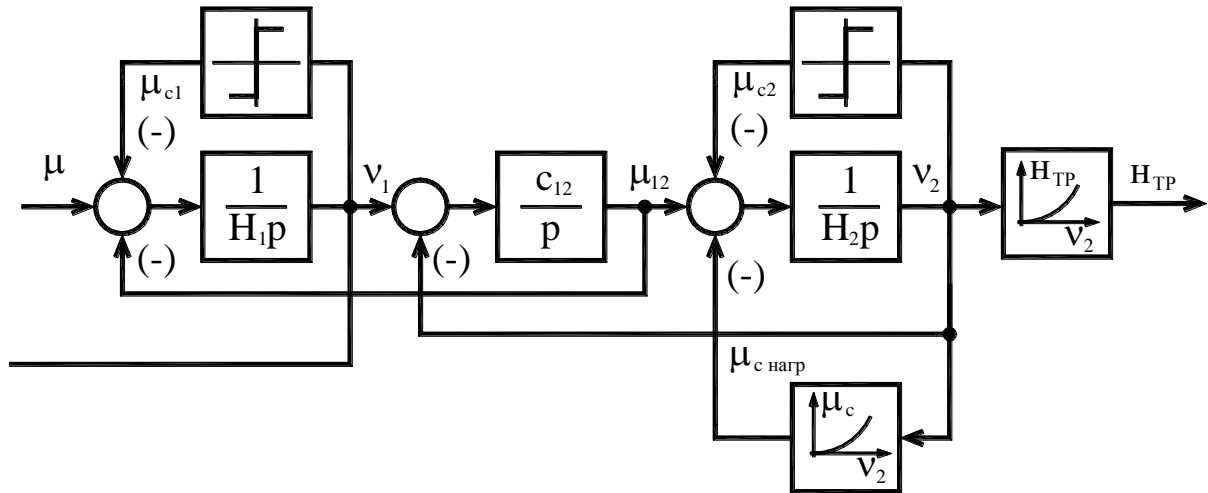


Рисунок 29. Структурная схема двухмассовой механической системы

Резонансная частота второй массы при жесткой заделке первой:

$$\Omega_{02} = \frac{\Omega_{12}}{\sqrt{\gamma}} = \frac{142,98}{\sqrt{1,818}} = 106,1 \text{ 1/с.} \quad (6.4)$$

В данном случае величины J_1 и J_2 соизмеримы, однако резонансная частота из-за большой жёсткости механической связи велика, а вентиляторная нагрузка является диссипативной нагрузкой, демпфирующей упругие колебания. Поэтому, если в системе нет условий для механического резонанса, т.е. отсутствуют возмущения, изменяющиеся с частотой, близкой $\Omega_{12} = 142,98 \text{ 1/с}$, учитывать упругости не следует. Положив связь между массами абсолютно жёсткой, определим момент инерции привода:

$$J_{\Sigma} = J_1 + J_2 = 0,55 + 0,45 = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Статический момент нагрузки:

$$M_c = M_{c1} + M_{c2} + M_{c \text{ нагр}} = 7,284 + 15 + 0,0013 \cdot \omega^2 = \text{Н} \cdot \text{м.} \quad (6.5)$$

Для построения модели электропривода приведём величины одно-массовой механической системы в системе относительных единиц:

$$H_{\Sigma} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_{\text{б}}^2}{M_{\text{б}} \cdot p} = \frac{1 \cdot 314,159^2}{176,93 \cdot 1} = 557,8 \quad \text{о.е.} \quad (6.6)$$

$$\mu_c = 0,126 + 0,7196 \cdot v_2^2 \quad \text{о.е.} \quad (6.7)$$

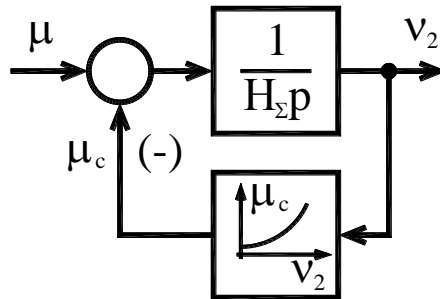


Рисунок 30. Структурная схема одномассовой механической системы

7. ВЕКТОРНОЕ ЧАСТОТНО-ТОКОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЭП НАСОСА

С целью получения повышенного качества динамических процессов, рассмотрим вариант векторного частотно-токового управления АД с КЗ. Регулировать скорость АД можно, если в качестве управляющего сигнала использовать не напряжение, а ток статора и частоту вращения [12]. В данном режиме ПЧ работает в режиме источника тока. При реализации режима источника тока, система уравнений 3.33 значительно упрощается, т.к. ток статора является задающим сигналом. Кроме того, на систему управления инвертором можно наложить дополнительные функции. Сориентируем ось x подвижной координатной системы по потокосцеплению ротора. Тогда $\vec{\Psi}_2 = \Psi_{2x}$, $\Psi_{2y} = 0$. Система уравнений 3.33 запишется в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} r(1+T_1p)I_{1x} = U_{1x} + x_1' v_{KC} I_{1y} + \frac{k_2}{T_2} \Psi_{2x} \\ r(1+T_1p)I_{1y} = U_{1y} - x_1' v_{KC} I_{1x} - k_2 v_r \Psi_{2x} \\ \frac{(1+T_2p)}{T_2} \Psi_{2x} = k_2 r_2 I_{1x} \\ 0 = k_2 r_2 I_{1y} - (v_{KC} - v_r) \Psi_{2x} \\ H \cdot p \cdot v_r = \mu - \mu_c \\ \mu = k_2 (\Psi_{2x} \cdot I_{1y}) \end{array} \right. \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} r(1+T_1p)I_{1x} = U_{1x} + x_1' v_{KC} I_{1y} + \frac{k_2}{T_2} \Psi_{2x} \\ r(1+T_1p)I_{1y} = U_{1y} - x_1' v_{KC} I_{1x} - k_2 v_r \Psi_{2x} \\ \frac{(1+T_2p)}{T_2 k_2 r_2} \Psi_{2x} = I_{1x} \\ v_{KC} = v_r + \frac{k_2 r_2 I_{1y}}{\Psi_{2x}} \\ H \cdot p \cdot v_r = \mu - \mu_c \\ \mu = k_2 (\Psi_{2x} \cdot I_{1y}) \end{array} \right.$$

В электроприводах с микропроцессорными системами управления применяются структуры с регуляторами скорости, потока, момента. Структурная схема частотно-токового векторного управления, построенная по преобразованной системе уравнений, приведена на рисунке 31.

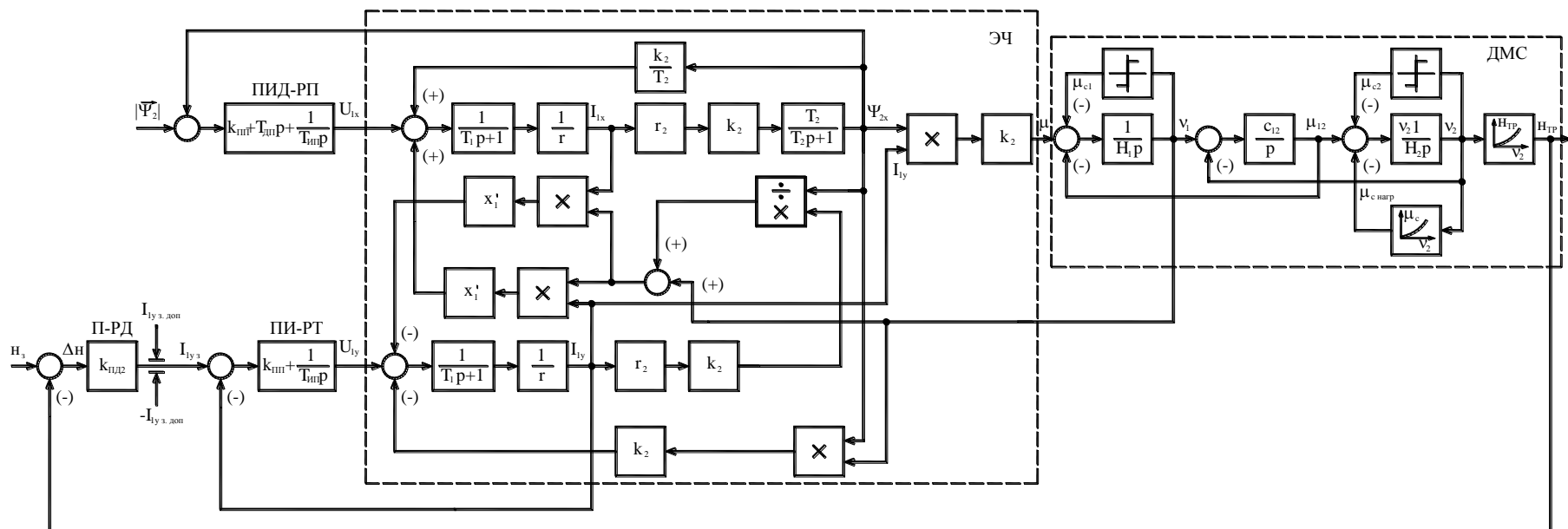


Рисунок 31. Структурная схема частотно-токового векторного управления с $|\overline{\Psi}_2| = \text{const}$ и прямой ориентацией по вектору $|\overline{\Psi}_2|$ с регуляторами тока (составляющей тока I_{iy}), потока и давления

7.1 Оптимальный структурно-параметрический синтез параметров регулятора контура потока

Синтез регуляторов при построении подчинённой системы в каждом канале осуществим с утверждением, что постоянная времени в канале управления потоком была, по крайней мере, на порядок меньше постоянной времени в канале управления скоростью. При этом пренебрегается влияние перекрёстных обратных связей [13].

Эквивалентная передаточная функция объекта регулирования контура потока:

$$W_{\text{раз.п.}}(p) = \frac{r_2 k_2 T_2}{r(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) - r_2 k_2^2},$$

Объект регулирования описывается колебательным звеном. Для получения эквивалентной передаточной функции замкнутого контура в виде апериодического звена необходимо получить передаточную функцию разомкнутой структуры вида:

$$W_{\text{раз.жел}}(p) = \frac{1}{T_{\text{оп.}} p},$$

В соответствии с этим запишем выражение для определения передаточной функции регулятора потока.

$$W_{\text{раз.п.}}(p) \cdot W_{\text{РП}}(p) = W_{\text{раз.жел}}(p) \Rightarrow W_{\text{РП}}(p) = W_{\text{раз.жел}}(p) \cdot W_{\text{раз.п.}}(p)^{-1},$$

Подставляя значения $W_{\text{раз.п.}}(p)$ и $W_{\text{раз.жел}}(p)$ получим:

$$W_{\text{РП}}(p) = \frac{r(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) - r_2 k_2^2}{r_2 k_2 T_2} \cdot \frac{1}{T_{\text{оп.}} p},$$

По виду передаточной функции исходного объекта регулирования можно сделать вывод о том, что структура регулятора должна быть пропорционально-интегрально-дифференциальная (ПИД) с передаточной функцией:

$$W_{\text{РП}}(p) = T_d p + \frac{1}{T_i p} + K_{\text{П}},$$

где $T_{дп}$, $T_{ип}$, – соответственно дифференциальная и интегральная постоянные времени регулятора потока, $K_{ип}$ – коэффициент усиления регулятора. Осуществим выбор постоянной времени $T_{оп.} = 1$ о.е.

$$W_{рп}(p) = T_{дп}p + \frac{1}{T_{ип}p} + K_{ип} = \frac{T_1 r}{T_{оп.} r_2 k_2} p + \frac{1}{\frac{T_{оп.} T_2 r_2 k_2}{r - r_2 k_2^2} p} + \frac{(T_1 + T_2) r}{T_{оп.} T_2 r_2 k_2},$$

где параметры регулятора:

$$T_{дп} = \frac{T_1 r}{T_{оп.} r_2 k_2} = \frac{5,445 \cdot 0,03319}{1 \cdot 0,01815 \cdot 0,979} = 9,833 \text{ о.е.},$$

$$T_{ип} = \frac{T_{оп.} T_2 r_2 k_2}{r - r_2 k_2^2} = \frac{1 \cdot 270,947 \cdot 0,01815 \cdot 0,979}{0,03319 - 0,01815 \cdot 0,979^2} = 327,689 \text{ о.е.},$$

$$K_{ип} = \frac{(T_1 + T_2) r}{T_{оп.} T_2 r_2 k_2} = \frac{(5,445 + 270,947) \cdot 0,03319}{1 \cdot 270,947 \cdot 0,01815 \cdot 0,979} = 1,842 \text{ о.е.}$$

7.2 Оптимальный структурно-параметрический синтез параметров регулятора контура тока

Исходная передаточная функция объекта регулирования разомкнутого контура тока:

$$W_{раз.т.}(p) = \frac{1}{r(T_1 p + 1)},$$

В соответствии с оптимизацией контура потока приведём передаточную функцию объекта регулирования к интегральному звену путём включения пропорционально-интегрального регулятора. При этом постоянная времени контура $T_{от.} = 10 \cdot T_{оп.} = 10$ о.е.

$$W_{рп}(p) = W_{раз.жел.т.}(p) \cdot W_{раз.т.}(p)^{-1} = K_{ип} + \frac{1}{T_{ит} p},$$

$$W_{рп}(p) = \frac{r(T_1 p + 1)}{T_{от.} p} = \frac{r T_1}{T_{от.}} + \frac{1}{\frac{T_{от.}}{r} p},$$

где $T_{ин}$, – интегральная постоянная времени регулятора тока, $K_{ПТ}$ – коэффициент усиления регулятора.

$$T_{ин} = \frac{T_{от.}}{r} = \frac{10}{0,03319} = 301,266 \text{ о.е.},$$

$$K_{ПТ} = \frac{T_1 r}{T_{от.}} = \frac{0,03319 \cdot 5,445}{10} = 0,0181 \text{ о.е.}$$

7.3 Оптимальный структурно-параметрический синтез параметров регулятора контура давления

Для оптимизации контура давления примем передаточную функцию замкнутого контура тока в соответствии с проведённой настройкой:

$$W_{зам.т.}(p) = \frac{1}{T_{от.}p + 1},$$

Контур содержит нелинейность вида: $H_{ТР} = \frac{H}{v_r^2} \cdot v_2^2 = \frac{1}{0,983^2} \cdot v_2^2 \text{ о.е.}$

проведём линеаризацию характеристики для настройки контура:

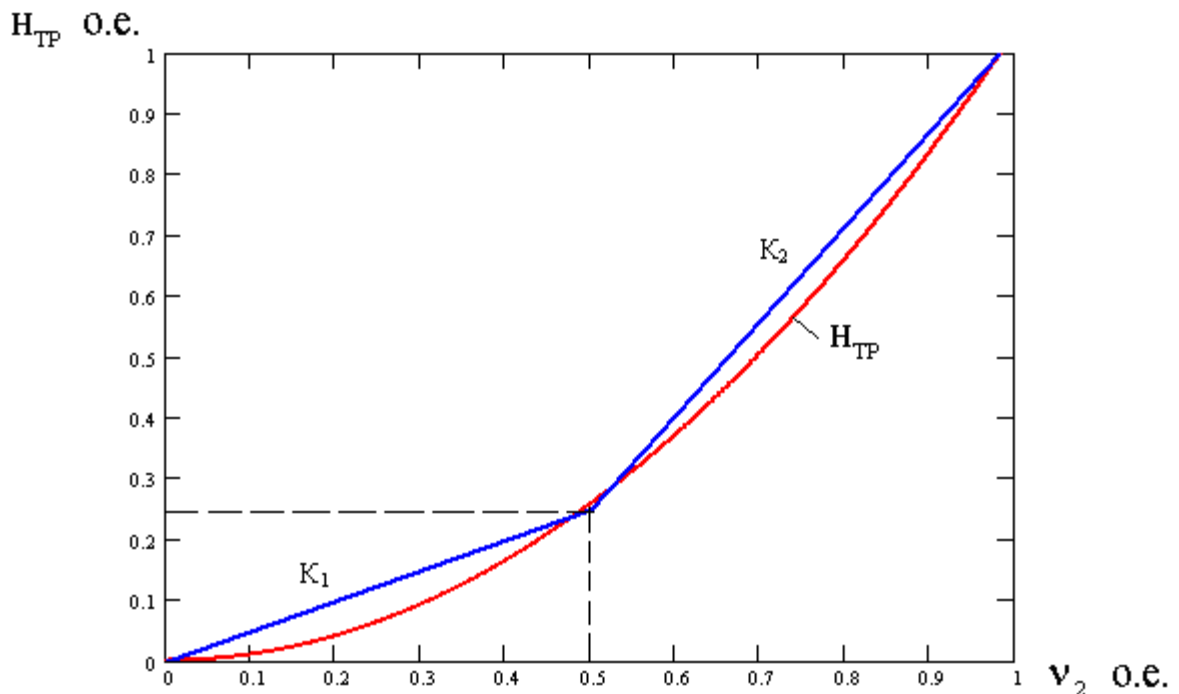


Рисунок 32. Линеаризация характеристики $H_{ТР} = \frac{H}{v_r^2} \cdot v_2^2 = \frac{1}{0,983^2} \cdot v_2^2 \text{ о.е.}$

Тогда характеристика давления запишется в виде:

$$H_{TP} = \frac{H}{v_r^2} \cdot \left[\frac{K_1}{K_2} \right] \cdot v_2 = \frac{1}{0,983^2} \cdot \left[\frac{0,5}{1,552} \right] \cdot v_2 \quad \text{о.е.}$$

$$W_{\text{раз.д.}}(p) = W_{\text{зам.т.}}(p) \cdot k_2 \cdot \frac{H}{v_r^2} \cdot \frac{1}{H_{\Sigma p}} \cdot \left[\frac{K_1}{K_2} \right] = \frac{k_2}{T_{0т.}p + 1} \cdot \frac{1}{H_{\Sigma p}} \cdot \frac{H}{v_r^2} \cdot \left[\frac{K_1}{K_2} \right],$$

Т.к. контур тока является внутренним по отношению к контуру скорости, то постоянная времени последнего будет равна $T_{0с.} = 2 \cdot T_{0т.} = 20 \text{ о.е.}$

Передаточная функция регулятора давления:

$$W_{PD}(p) = W_{\text{зам.жел.д.}}(p) \cdot W_{\text{раз.д.}}(p)^{-1} = K_{PD},$$

$$W_{PD1}(p) = W_{\text{зам.жел.д.}}(p) \cdot W_{\text{раз.д.}}(p)^{-1} = \frac{H_{\Sigma}}{T_{0с.}} \cdot \frac{T_{0т.}p + 1}{k_2} \cdot \frac{v_r^2}{H \cdot K_1},$$

$$W_{PD2}(p) = W_{\text{зам.жел.д.}}(p) \cdot W_{\text{раз.д.}}(p)^{-1} = \frac{H_{\Sigma}}{T_{0с.}} \cdot \frac{T_{0т.}p + 1}{k_2} \cdot \frac{v_r^2}{H \cdot K_2},$$

где K_{PD} – коэффициент усиления регулятора давления.

$$K_{PD1} = \frac{H_{\Sigma}}{T_{0с.} \cdot k_2} \cdot \frac{v_r^2}{H \cdot K_1} = \frac{557,8 \cdot 0,983^2}{20 \cdot 0,979 \cdot 1 \cdot 0,5} = 55,056 \quad \text{о.е.},$$

$$K_{PD2} = \frac{H_{\Sigma}}{T_{0с.} \cdot k_2} \cdot \frac{v_r^2}{H \cdot K_2} = \frac{557,8 \cdot 0,983^2}{20 \cdot 0,979 \cdot 1 \cdot 1,552} = 17,737 \quad \text{о.е.}$$

Характеристика регулятора давления приведена на рисунке 33.

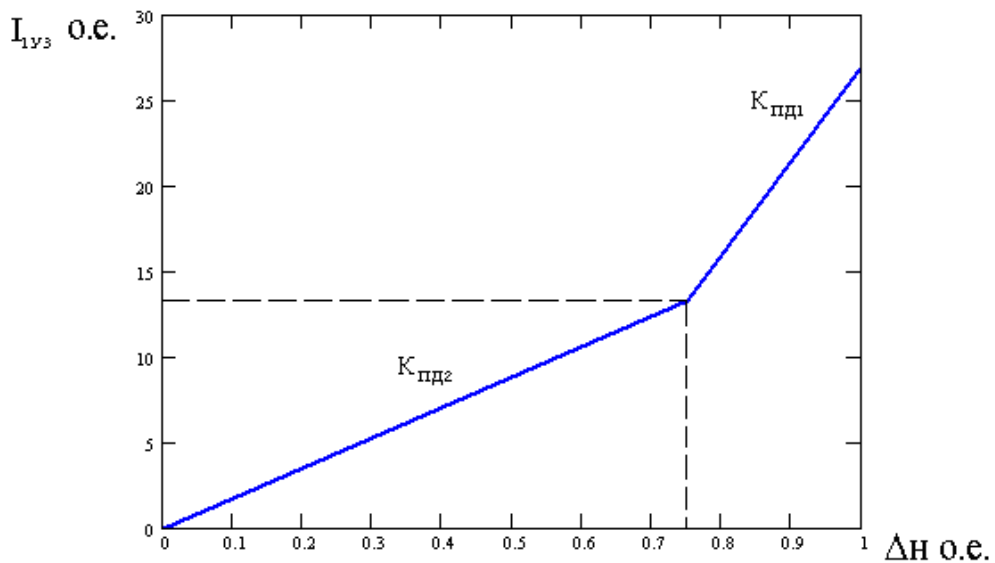


Рисунок 33. Характеристика регулятора давления РЭП насоса

7.4 Имитационная модель векторного частотно-токового управления РЭП насоса

Для построения модели векторного частотно-токового управления РЭП насоса воспользуемся преобразованной системой уравнений. При этом в систему включена ДМС. Структура векторного управления использует информацию с датчиков тока и давления. Ограничение выхода регулятора давления определяют ограничение тока в системе на уровне $\pm 1,5 \cdot I_{ly}$. При этом ограничении регулятор давления всегда работает с коэффициентом передачи $K_{пд2} = 17,737$ о.е. При отсутствии ограничения в момент пуска характеристика тока более чем в пять раз превышает базовое значение[14]. Схема имитационной модели векторного частотно-токового управления приведена на рисунке 34.

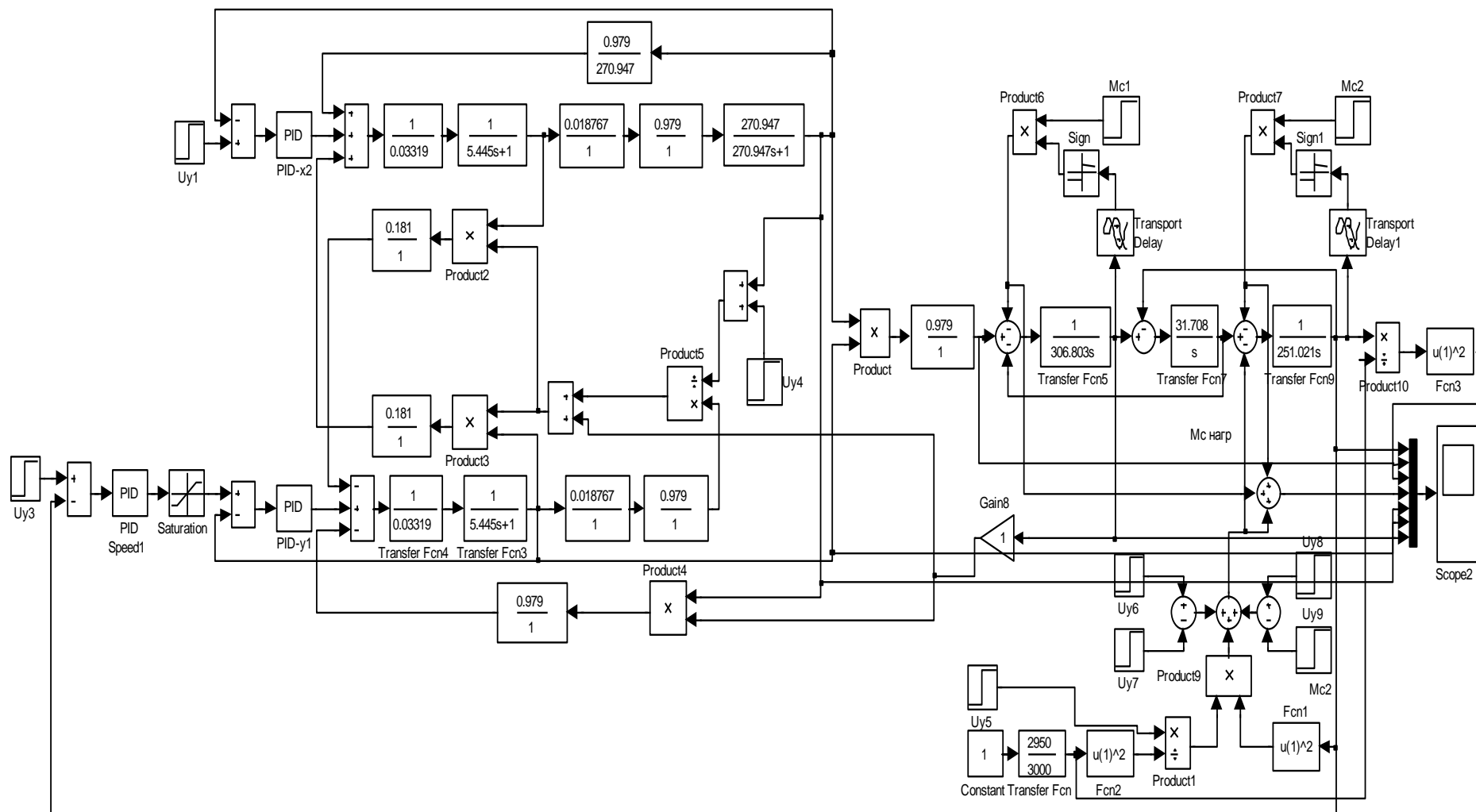


Рисунок 34. Имитационная наборная модель векторного частотно-токового управления РЭП насоса в программной среде MATLAB

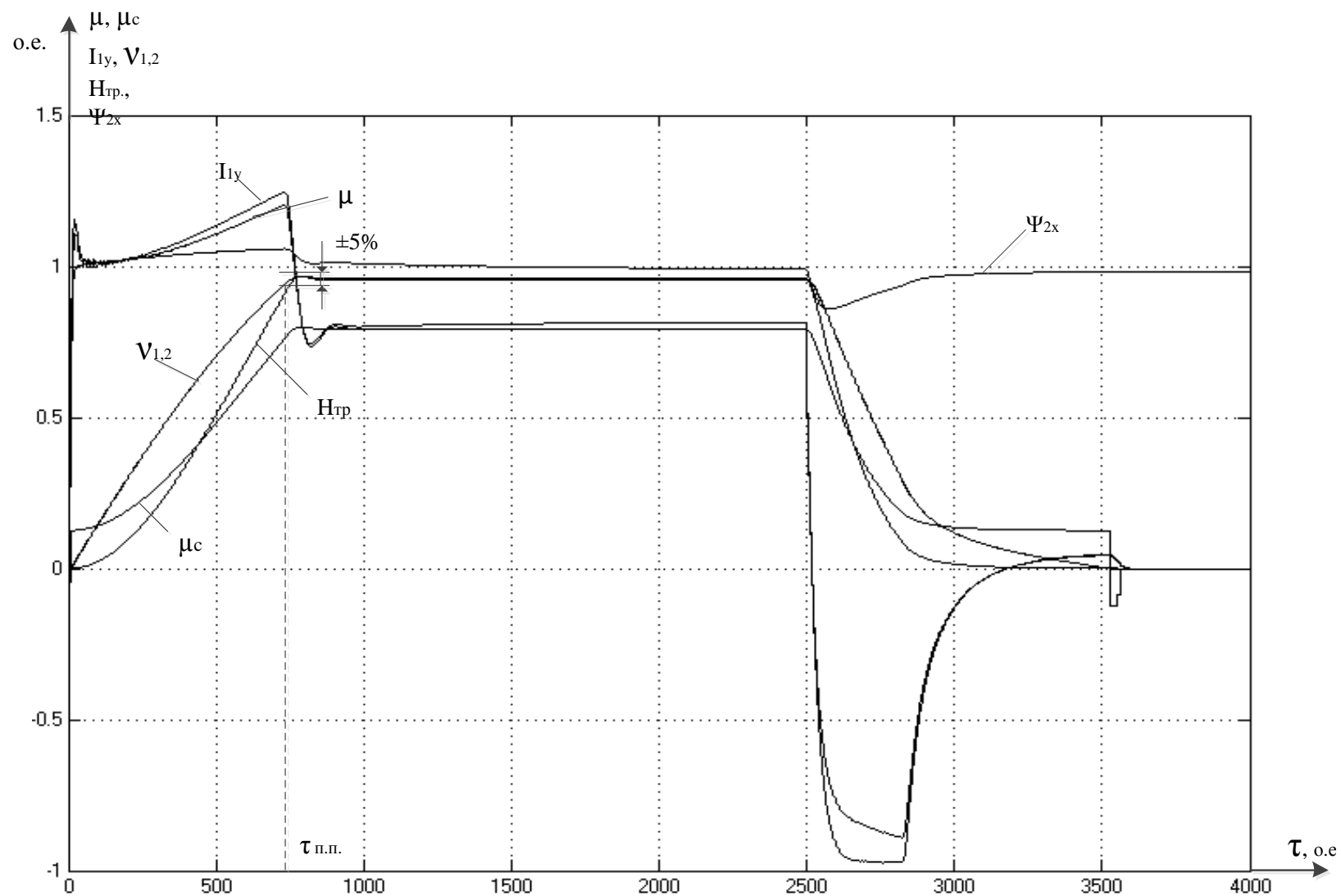


Рисунок 35. Динамические характеристики $v_1, v_2 = f(\tau)$; $\mu, \mu_c = f(\tau)$; $I_1 = f(\tau)$; $H_{тр} = f(\tau)$; $\Psi_1 = f(\tau)$ векторного частотно-токового управления, пуск, останов

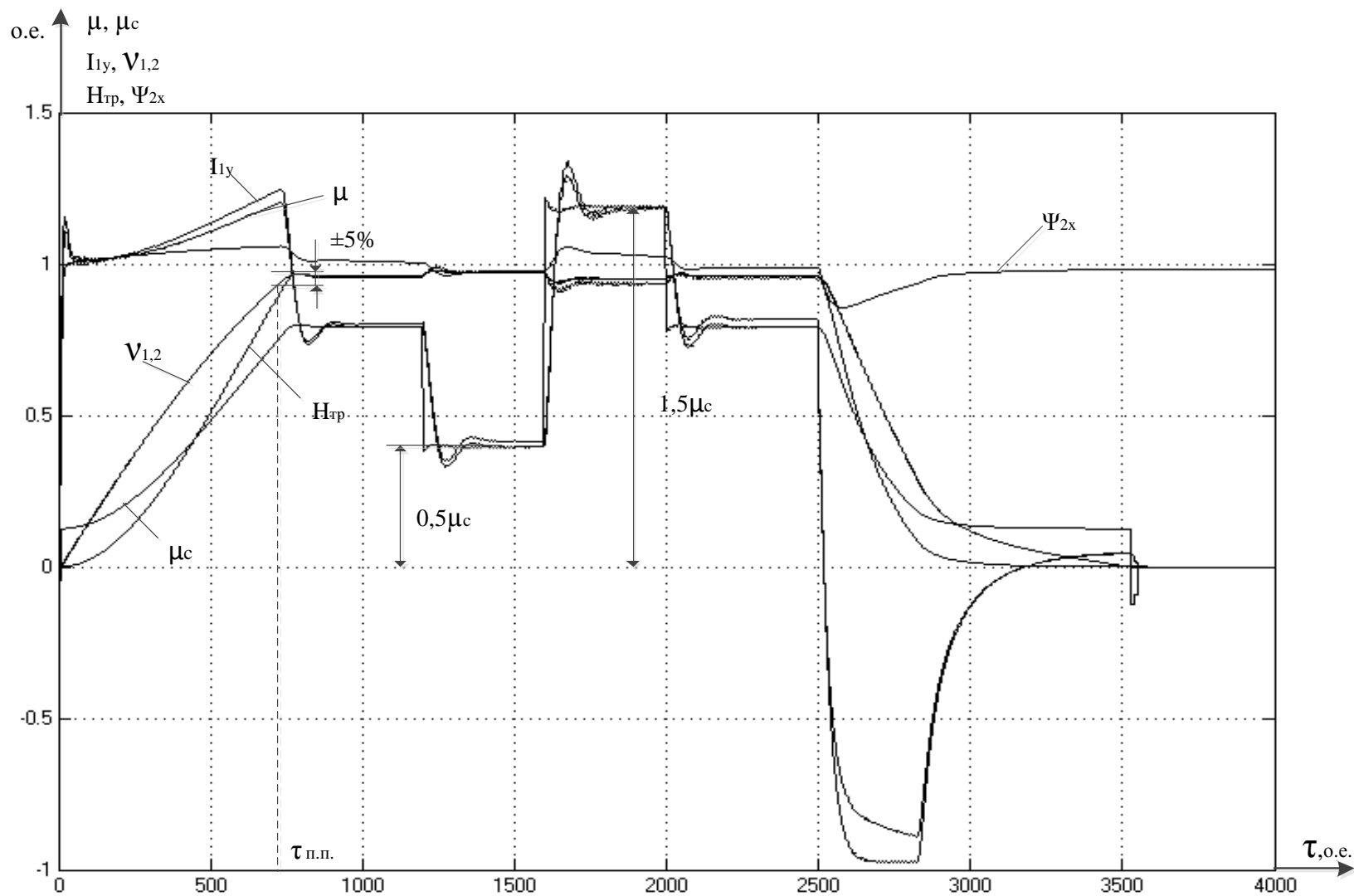


Рисунок 36. Динамические характеристики $v_1, v_2 = f(\tau)$; $\mu, \mu_c = f(\tau)$; $I_1 = f(\tau)$; $H_{тр} = f(\tau)$; $\Psi_1 = f(\tau)$ векторного частотно-токового управления; пуск, сброс нагрузки до $\mu_c = 0,5 \cdot \mu_{с.ном}$ и наброс до $\mu_c = 1,5 \cdot \mu_{с.ном}$; останов

На данной модели проведены следующие исследования. Пуск системы РЭП насоса с открытым клапаном. После окончания процесса разгона сигнал останова двигателя в точке $\tau_{\text{ост}} = 2500$ о.е. рисунок 36. Как и в системе скалярного управления рассмотрен случай сброса нагрузки до значения $\mu_c = 0,5 \cdot \mu_{\text{с.ном}}$ с последующим набросом до $\mu_c = 1,5 \cdot \mu_{\text{с.ном}}$, рисунок 37.

7.5 Динамические характеристики системы векторного частотно-токового управления

Значения момента на всём протяжении разгона и торможения не превышают $\pm 1,25 \cdot M_b$. Скорость и требуемый напор достигают установившегося значения при $\tau_{\text{п/п}} \approx 740$ о.е., что соответствует времени разгона $t_{\text{п/п}} = \tau_{\text{п/п}} \cdot t_b = \frac{740}{314,159} \approx 2,356$ с. Характеристики скорости и давления достигают установившегося значения со значением перерегулирования не превышающего сотую часть базового значения. Сброс и наброс нагрузки приводят к изменению давления в пределах $n_{\text{тр уст}} \pm 0,01-0,03$ о.е., что соизмеримо с точностью датчика давления. Влияния упругих колебаний ДМС при данной настройке системы не наблюдается.

8. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- планирование научно-исследовательских работ;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

С учетом решения данных задач была сформирована структура и содержание раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».

8.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

В данном случае сегментирования целесообразно провести по критерию энергоэффективности, т.к. требуется целесообразное использование ресурсов электрической энергии.

А также следует выделить сегменты рынка:

- по разработке, проектированию и производству;
- по дальнейшему обслуживанию и ремонту.

Исходя из сегмента рынка, будет произведено сегментирование коммерческих организаций по отраслям. Сегментирование приведено в таблице 5.

Таблица 5 – Карта сегментирования рынка разработок для автоматизированного регулирования напора воды в системах отопления

	Электропривод по системе ТРН-АД	Электропривод по системе ПЧ-СД	Электропривод по системе ПЧ-АД
Проектирование и производство			
Установка и пусконаладка			
Обслуживание и ремонт			
ООО «Инженерные системы плюс»		ООО «Теплоконтроль»	

Результаты сегментирования:

- Основными сегментами рынка являются все виды деятельности для асинхронных электроприводов с ПЧ-АД, ПЧ-СД и ТРН-АД;
- Такие системы автоматизированного регулирования необходимы для теплоснабжающих организаций, также их используют в административных и жилых зданиях. Основными потребителями являются ЖКХ, ТСЖ и управляющие компании.

Технология QuaD

Технология QuaD (QUality ADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект.

В основе технологии QuaD лежит нахождение средневзвешенной величины следующих групп показателей:

1) Показатели оценки коммерческого потенциала разработки:

- влияние нового продукта на результаты деятельности компании;
- перспективность рынка;
- перспективы конструирования и производства;
- финансовая эффективность.
- правовая защищенность и др.

2) Показатели оценки качества разработки:

- динамический диапазон;
- вес;
- ремонтпригодность;
- энергоэффективность;
- долговечность;
- унифицированность;
- уровень материалоемкости разработки и др.

Показатели оценки качества и перспективности новой разработки подбираются исходя из выбранного объекта исследования с учетом его технических и экономических особенностей разработки, создания и коммерциализации.

Для упрощения процедуры проведения QuaD оценка проводится в табличной форме (табл. 6).

В соответствии с технологией QuaD каждый показатель оценивается экспертным путем по стобалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Таблица 6 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)x100
1	2	3	4	5	
Показатели оценки качества разработки					
1. Повышение производительности труда пользователя	0,07	95	100	0,95	6,65
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,11	87	100	0,87	9,57
3. Помехоустойчивость	0,03	90	100	0,9	2,7
4. Энергоэкономичность	0,11	90	100	0,9	9,9
5. Надежность	0,07	97	100	0,97	6,79
6. Уровень шума	0,03	80	100	0,8	2,4
7. Безопасность	0,01	80	100	0,8	4
8. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,04	85	100	0,85	3,4
9. Простота эксплуатации	0,04	98	100	0,98	3,92
10. Качество интеллектуального интерфейса	0,05	96	100	0,96	4,8
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
1. Конкурентоспособность продукта	0,04	90	100	0,9	3,6
2. Уровень проникновения на рынок	0,04	70	100	0,7	2,8
3. Цена	0,1	65	100	0,65	6,5
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,07	95	100	0,95	6,65
5. Послепродажное обслуживание	0,03	90	100	0,9	2,7
6. Финансирование научной разработки	0,05	78	100	0,78	3,9
7. Срок выхода на рынок	0,03	71	100	0,71	2,13
8. Наличие сертификации разработки	0,04	80	100	0,8	3,2
Итого	1				85,61

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum B_i \cdot B_i = 0,07 \cdot 95 + 0,11 \cdot 87 + \dots + 0,04 \cdot 80 = 85,61,$$

где P_{cp} – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

Значение P_{cp} получилось равным 85,61, что говорит о том, что данная разработка является перспективной.

SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Он проводится в несколько этапов.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде. Дадим трактовку каждому из этих понятий.

1. **Сильные стороны.** Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей. При этом важно рассматривать сильные стороны и с точки зрения руководства проекта, и с точки зрения тех, кто в нем еще задействован. При этом рекомендуется задавать следующие вопросы:

- Какие технические преимущества вы имеете по сравнению с конкурентами?

- Что участники вашего проекта умеют делать лучше всех?

- Насколько ваш проект близок к завершению по сравнению с конкурентами?

2. **Слабые стороны.** Слабость – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами. Чтобы прояснить в каких аспектах вас, возможно, превосходят конкуренты, следует спросить:

- Что можно улучшить?

- Что делается плохо?

- Чего следует избегать?

3. **Возможности.** Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию. Формулирование возможностей проекта можно упростить, ответив на следующие вопросы:

- Какие возможности вы видите на рынке? Проводите поиск свободных ниш, но помните, что свободными они остаются недолго. Благоприятная возможность, увиденная сегодня, может перестать существовать уже через три месяца. Благоприятные возможности могут возникать в силу действия следующих факторов:

- изменения в технологической сфере и на рынке – как мирового, так и регионального масштаба;

- изменения правительственной политики в отношении отрасли, где проводится научное исследование;

- изменения социальных стандартов, профиля населения, стиля жизни и т.д.

- В чем состоят благоприятные рыночные возможности?
- Какие интересные тенденции отмечены?
- Какие потребности, пожелания имеются у покупателя, но не удовлетворяются конкурентами?

4. **Угроза** представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту. Для выявления угроз проекта рекомендуется ответить на следующие вопросы:

- Какие вы видите тенденции, которые могут уничтожить ваш научно-исследовательский проект или сделать его результаты устаревшими?
- Что делают конкуренты?
- Какие препятствия стоят перед вашим проектом?
- Изменяются ли требуемые спецификации или стандарты на результаты научного исследования?
- Угрожает ли изменение технологии положению вашего проекта?
- Имеются ли у руководства проекта проблемы с материально-техническим обеспечением?

Результаты первого этапа SWOT-анализа представляем в таблице 7.

Таблица 7 – Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии. С2. Экологичность технологии.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.
	С3. Более низкая стоимость	Сл2. Отсутствие необходимо-

	<p>производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p>С4.Повышение производительности труда.</p> <p>С5. Квалифицированный персонал.</p> <p>С6. Высокий срок эксплуатации.</p> <p>С7.Надежность данной системы по сравнению с другими.</p> <p>С8. Высокое качество продукции.</p> <p>С9. Универсальность схемы управления.</p>	<p>го оборудования для проведения испытаний опытного образца.</p> <p>Сл3. Большой срок выхода на рынок.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1.Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В2.Появление дополнительного спроса на новый продукт</p> <p>В3. Снижение стоимости на электроэнергию и материалы, используемые при научных исследованиях</p> <p>В4. Повышение стоимости конкурентных разработок</p> <p>В5. Развитие технологий в данной отрасли</p>		
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.</p> <p>У2. Развитая конкуренция технологий производства</p> <p>У3. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции</p> <p>У4.Экономическая ситуация в стране, влияющая на спрос.</p> <p>У5. Появление новых конкурентных разработок.</p>		

Описание сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта, его возможностей и угроз должно происходить на основе результатов анализа, проведенного в предыдущих разделах бакалаврской работы.

После того как сформулированы четыре области SWOT переходим к реализации второго этапа.

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Возможно использование этой матрицы в качестве одной из основ для оценки вариантов стратегического выбора. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-». Полученная интерактивная матрица проекта представлена в табл. 8.

Таблица 8 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта										
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	B1	0	+	0	+	+	0	+	+	+
	B2	+	+	+	+	-	+	+	+	+
	B3	+	-	+	+	-	+	+	0	+
	B4	+	-	-	0	+	+	+	+	+
	B5	+	0	+	+	+	+	+	+	+

Результаты анализа таблицы:

B1C2C4C5C7C8C9

B2C1C2C3C4C6C7C8C9

B3C1C3C4C6C7C9

B4C1C5C6C7C8C9

B5C1C3C4C5C6C7C8C9

Продолжение таблицы 8.

Слабые стороны проекта				
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	B1	-	-	-
	B2	-	-	-
	B3	-	-	-
	B4	-	-	0
	B5	+	0	0

Результаты анализа таблицы:

B5Сл1

Продолжение таблицы 8.

Сильные стороны проекта

Угрозы		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	У1	-	-	-	-	+	-	-	-	-
	У2	0	0	-	-	-	-	-	-	+
	У3	+	0	+	+	-	+	0	0	0
	У4	-	-	-	0	-	-	-	-	-
	У5	0	-	-	-	+	-	-	-	-

Результаты анализа таблицы:

У1С5

У3С1С3С4С6

У2С9

У5С5

Окончание таблицы 8.

Слабые стороны проекта				
Угрозы		Сл1	Сл2	Сл3
	У1	+	0	0
	У2	-	+	0
	У3	+	+	+
	У4	+	-	-
	У5	+	0	0

Результаты анализа таблицы:

У1Сл1

У2Сл2

У3Сл1Сл2Сл3

У4Сл1

У5Сл1

Составляем итоговую матрицу SWOT-анализа (табл. 9).

Таблица 9 – Итоговая матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии. С2. Экологичность технологии. С3. Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями. С4.Повышение производительности труда.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой. Сл2. Отсутствие необходимого оборудования для проведения испытаний опытного образца.
	С5. Квалифицированный персонал. С6. Высокий срок эксплуатации. ...	Сл3. Большой срок выхода на рынок

Возможности: В1.Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2.Появление дополнительного спроса на новый продукт В3. Снижение стоимости на электроэнергию и материалы, используемые при научных исследованиях В4. Повышение стоимости конкурентных разработок В5. Развитие технологий в данной отрасли	В1С2С4С5С7С8С9 В2С1С2С3С4С6С7С8С9 В3С1С3С4С6С7С9 В4С1С5С6С8С9 В5С1С3С4С5С6С7С8С9	В5Сл1
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства. У2. Развитая конкуренция технологий производства У3. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции У4.Экономическая ситуация в стране, влияющая на спрос. У5. Появление новых конкурентных разработок.	У1С5 У3С1С3С4С6 У2С9 У5С5	У1Сл1 У2Сл2 У3Сл1Сл2Сл3 У4Сл1 У5Сл1

В результате проведённого SWOT-анализа выявлены сильные стороны разрабатываемого проекта, в качестве которых выступает энергоэффективность, низкая стоимость, конкурентоспособность, высокий срок работы и повышение производительности труда. В качестве угроз для данного продукта выступает сложная экономическая ситуация в стране, развитая конкуренция и застой развития технологий на производствах. Имеются сильные и слабые стороны в проекте, которые описывают возможность его реализации на ранке потребителям.

Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

8.2. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

В предыдущем разделе были описаны методы, которые позволяют выявить и предложить возможные альтернативы проведения исследования и доработки результатов. К их числу относятся технология QuaD, оценка конкурентных инженерных решений, SWOT-анализ. К ним можно добавить ФСА-анализ, метод Кано. Однако, в большей степени все приведенные методы ориентированы на совершенствование результатов научного исследования, находящегося на стадии создания макета, модели системы, прототипа, конечного продукта. Если разработка находится на перечисленных стадиях жизненного цикла нового продукта, можно предложить не менее трех основных вариантов совершенствования разработки или основных направлений научного исследования.

Разработка относится к вышеописанным стадиям, поэтому нет необходимости использовать морфологический подход.

8.3. Планирование научно-исследовательских работ

Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. Составляем перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, проводим распределение исполнителей по видам работ. Результат представлен в табл.10.

Таблица 10 – перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
----------------	-------	------------------	-----------------------

Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Описание объекта модернизации	Инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Разработка структурной схемы	Инженер
	6	Расчет параметров силового оборудования	Инженер
	7	Расчет рабочих характеристик	Инженер
	8	Разработка системы управления и защиты	Инженер
	9	Разработка математической модели	Инженер
	10	Оптимизация установки	Инженер
	11	Разработка программы имитационного моделирования	Инженер
Обобщение и оценка результатов	12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель
Разработка технической документации и проектирование	13	Технико-экономические расчеты	Инженер
	14	Вопросы безопасности и экологичности проекта	Инженер
	15	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Инженер

Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаях образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожи}$ используется следующая формула:

$$t_{ожи} = \frac{3t_{мини} + 2t_{макс i}}{5},$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Разработка графика проведения научного исследования

При выполнении дипломных работ студенты в основном становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем. Поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где T_{ki} — продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} — продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ — коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где $T_{\text{кал}}$ — количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ — количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ — количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа.

Все рассчитанные значения сводим в таблицу (табл. 11).

Пример расчета (составление и утверждение технического задания):

$$t_{\text{ож}} = \frac{3 \cdot t_{\text{min}} + 2 \cdot t_{\text{max}}}{5} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 2}{5} = 1,4 \approx 2 \text{ чел} - \text{дней};$$

$$T_p = \frac{t_{\text{ож}}}{\text{Ч}} = \frac{2}{1} = 2 \text{ дня};$$

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 116 - 14} = 1,553;$$

$$T_k = T_p \cdot k_{\text{кал}} = 2 \cdot 1,553 = 3,106 \approx 4 \text{ дня}.$$

Таблица 11 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ			Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни	t_{max} , чел-дни	$t_{\text{ож}i}$, чел-дни		

	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Составление и утверждение технического задания	1		2		2		2		4	
Подбор и изучение материалов по теме		5		8		7		7		11
Описание объекта модернизации		3		4		4		4		7
Календарное планирование работ по теме	3		5		4		4		7	
Разработка структурной схемы		4		9		6		6		10
Расчет параметров силового оборудования		4		6		5		5		8
Расчет рабочих характеристик		2		4		8		8		12
Разработка системы управления и защиты		2		4		3		3		5
Разработка математической модели автоматизированной системы управления	3		6		5		5		8	
Оптимизация оборудования		4		8		6		6		10
Разработка программы имитационного моделирования		5		8		7		7		11
Оценка эффективности полученных результатов	2		3		3		3		5	
Технико-экономические расчеты		3		7		5		5		8
Вопросы безопасности и экологичности проекта		3		7		5		5		8
Составление пояснительной записки		1		3		2		2		4

На основе табл. 11 строим календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. Работы на графике выделяем различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 12 – Календарный план этапов

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.	Дата начала этапа	Дата окончания этапа
-------	---------------------	---------------------------	------------------------	-------------------	----------------------

1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	4	14.02.2018	17.02.2018
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	11	18.02.2018	28.01.2018
3	Описание объекта модернизации	Инженер	7	29.01.2018	04.02.2018
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	7	5.02.2018	11.02.2018
№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудо-емкость, чел.-дн.	Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.	Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	4	12.02.2018	15.02.2018
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	11	16.02.2018	26.02.2018
3	Описание объекта модернизации	Инженер	7	27.02.2018	05.03.2018
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	7	06.03.2018	12.03.2018
5	Разработка структурной схемы	Инженер	10	13.03.2018	22.03.2018
6	Расчет параметров силового оборудования	Инженер	8	23.03.2018	30.03.2018
7	Расчет рабочих характеристик	Инженер	12	31.03.2018	11.04.2018
8	Разработка системы защиты	Инженер	5	12.04.2018	16.04.2018
9	Разработка математической модели	Руководитель	3	17.04.2018	19.04.2018

Продолжение таблицы 12

10	Оптимизация установки	Инженер	10	20.04.2018	29.04.2018
11	Разработка программы имитационного моделирования	Инженер	11	30.04.2018	9.05.2018
12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	2	10.05.2018	11.05.2018
13	Технико-экономические расчеты	Инженер	8	12.05.2018	19.05.2018
14	Вопросы безопасности и экологичности проекта	Инженер	8	20.05.2018	27.05.2018
15	Составление пояснительной записки	Инженер	4	28.05.2018	31.05.2018

Таблица 13 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ ра бо т	Вид работ	Испол- нители	T _{кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				фев.		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	4														
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	11														
3	Описание объекта модернизации	Инженер	7														
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	7														
5	Разработка структурной схемы	Инженер	10														
6	Расчет параметров силового оборудования	Инженер	8														
7	Выбор способа регулирования скорости	Инженер	12														

Продолжение таблицы 13

[illegible]

Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;

- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

Все необходимое оборудование и материалы имеются в лаборатории, поэтому расчет материальных затрат проводить не будем.

Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп} ,$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата;

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $З_{осн}$).

Основная заработная плата ($З_{осн}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p ,$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 5.8);

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{он} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{34094 \cdot 10,4}{237} = 1496 \text{ руб.},$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (табл.14).

Таблица 14 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	52
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	48
- невыходы по болезни	14	14
Действительный годовой фонд рабочего времени	237	237

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{ТС} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p = 17484 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 34094 \text{ руб}$$

где $Z_{ТС}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{ТС}$);

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от $Z_{ТС}$);

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Тарифная заработная плата $Z_{тс}$ находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда $T_{ci} = 600$ руб. на тарифный коэффициент k_t и учитывается по единой для бюджетной организации тарифной сетке. Для предприятий, не относящихся к бюджетной сфере, тарифная заработная плата (оклад) рассчитывается по тарифной сетке, принятой на данном предприятии. Расчёт основной заработной платы приведён в табл.15.

Таблица 15 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель						300	24	7200
Инженер	17808	0,3	0,2	1,3	34725	1523	95	144685
Итого $Z_{осн}$								151885

Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,12 \cdot 144685 = 17362 \text{ руб}$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) = 0,271 \cdot 7200 = 1951 \text{ руб.},$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2015 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2015 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представляем в табличной форме (табл.16).

Таблица 16 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель проекта	7200	
Студент-дипломник	144685	17362
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
Итого		
Руководитель	1951	
Инженер	39209	

Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$\begin{aligned} З_{накл} &= (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{нр} = (З_{осн} + З_{доп} + З_{внеб}) \cdot 0,16 = \\ &= (151885 + 17362 + 41160) \cdot 0,16 = 33665 \end{aligned}$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

8.4. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в табл.17.

Таблица 17 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	151885
2. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	17362
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	151885
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	17362
5. Отчисления во внебюджетные фонды	41160
6. Накладные расходы	33665
7. Бюджет затрат НТИ	244072

Определение ресурсоэффективности проекта

Финансовую эффективность проекта можно оценить при помощи интегрального финансового показателя:

$$I_{фин}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}},$$

где:

$I_{фин}^{исп.i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Расчёт интегрального финансового показателя проводим в виде табличной формы.

Таблица 18 – Расчёт интегрального финансового показателя конкурентных технических решений

Вариант схемы	Φ_{max} , руб.	Φ_{pi} , руб.	$I_{фин}^{исп.i}$, о.е.
1	321820	321820	1
2		245210	0,762
3		220100	0,684

Величина интегрального финансового показателя разработки схемы 3 (сварочный инверторный аппарат) отражает соответствующее численное удешевление стоимости аппарата при одинаковой мощности. Схема 3 имеет наименьший интегральный показатель среди трёх конкурентных технических решений, и, следовательно, вариант схемы является наиболее финансово эффективным, что является определяющим критерием.

Определение ресурсоэффективности проекта схемы 3 можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

b_i – балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Расчёт интегрального показателя ресурсоэффективности схем проводим в виде табличной формы.

Таблица 19 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Электропривод по системе управления ПЧ-СД	Электропривод по системе управления ТРН-АД	Электропривод по системе управления ПЧ-АД
1. Безопасность	0,25	5	5	5
2. Удобство в эксплуатации	0,10	5	5	5
3. Помехоустойчивость	0,10	4	4	4
4. Энергосбережение	0,15	4	4	5
5. Надёжность	0,25	4	5	5
6. Материалоёмкость	0,15	4	4	4
Итого:	1,00	4,35	4,5	4,75

Рассчитываем показатель ресурсоэффективности:

$$I_p = 0,25 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 = 4,75.$$

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет достаточно высокое значение, что говорит об эффективности использования разработок технического проекта.

Таким образом, автоматизированной системы управления потоком воды в системах отопления, с использованием системы ПЧ-АД остается эффективным и в настоящее время. Переход к использованию таких аппаратов целесообразен при замене устаревшего оборудования, или в тех случаях, когда применение других аппаратов не целесообразно, ввиду широкого ряда преимуществ среди конкурентной продукции, а также из-за высоких энергоэффективных показателей.

Вывод по разделу

В ходе выполнения экономической части выпускной квалификационной работы проведены оценка коммерческого потенциала и перспективности пове-

дения научных исследований, SWOT-анализ, благодаря которым была доказана целесообразность применения данной разработки и ее конкурентоспособность. Планирование ограничило выполнение работы в 111 дней. Бюджет научно-технического исследования составил 244072 руб.

9. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Данный раздел ВКР посвящен рассмотрению безопасных условий труда в производственном помещении, в котором производится проектировка и пусконаладочные работы, связанные с автоматизированным регулированием напора воды в системах отопления, со стороны ее безопасности экологичности.

Рассмотрены требования необходимые для благоприятных условий труда. Эти требования соответствуют действующим нормативным документам.

В основе безопасности лежит анализ опасных и вредных факторов, а также профилактические меры по их устранению. Опасные факторы состоят из воздействий на работника, которые могут привести к его травме или ухудшению здоровья (электрический ток, короткое замыкание). Вредные факторы воздействуют на рабочего, в определенных условиях, приводит к его заболеванию или снижению работоспособности (недостаточное освещение, вибрации, недопустимый уровень шума)[15].

9.1. Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению

Помещение, где реализован монтаж проекта автоматизированного регулирования напора воды в системах отопления, относится к классу помещения с повышенной опасностью по опасности поражения человека электрическим током. Ввиду того, что: относительная влажность воздуха может достигать 75% , рабочая температура длительно превышающая 30°C, размещены электроустановки с металлическими корпусами, имеющими соединение с землей, металлоконструкцией здания и оборудования одновременно[16].

Основным опасным фактором является возможность поражения электрическим током, а также захват и повреждение вращающимися частями механизма, при проведении работ и регламентных осмотрах. Для снижения уровня опасности проводится заземление электроустановок, насосов и прочего оборудования, а также заграждение токоведущих частей. Заземляющее устройство (ЗУ) состоит из заземлителя (проводящей части или совокупности соединённых между собой проводящих частей, находящихся в электрическом контакте с землёй непосредственно или через промежуточную проводящую среду) и заземляющего проводника, соединяющего заземляемую часть с заземлителем. Заземлитель может быть простым металлическим стержнем (чаще всего стальным) или сложным комплексом элементов специальной формы. Для снижения риска повреждения устанавливают кожухи или защитные экраны в местах открытых движущихся механических частей[17].

Для защиты от воздействия тока на человека устанавливают УЗО в электрическом щите, а для полного размыкания цепи устанавливают автоматические выключатели. Также все провода прокладывают в специальные кабель каналы и лотки, во избежание прямого соприкосновения человека с токоведущими жилами, вследствие их разрушения или деформации.

9.2. Анализ вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению

Обеспечение комфортных условий труда в значительной степени оказывает влияние на производительность труда и снижение профессиональных заболеваний. К ним относятся меры, связанные с исключением травматизма, антисанитарии и возгораний[18].

На рабочих могут воздействовать следующие вредные факторы:

- недостаточная освещенность;

Искусственное освещение необходимо для компенсации недостатка естественного освещения в светлое время суток, а также используется для освещения производственных помещений в то время, когда естественный свет не удовлетворяет санитарным нормам[19].

Производим расчет светильников:

Данные, необходимые для расчета искусственного освещения:

- длина помещения $A_{\text{пом}} = 12 \text{ м};$
- ширина $B_{\text{пом}} = 6 \text{ м};$
- высота $H_{\text{пом}} = 3 \text{ м};$
- коэффициент отражения стен $R_c = 30\%;$
- высота рабочей поверхности $h_p = 0,5 \text{ м};$
- коэффициент отражения потолка $R_n = 50\%;$
- коэффициент запаса $k = 1,5;$
- коэффициент неравномерности $Z = 1,1.$

Требуется создать освещенность $E = 300 \text{ Лк};$

Рассчитаем систему общего освещения (люминесцентного).

Выбираем светильники типа ОД с $\lambda = 1,4.$

Принимаем $h_c = 0,1 \text{ м}$ и получаем

$$h = H - h_c - h_p = 3 - 0,1 - 0,5 = 2,4 \text{ м},$$

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,4 = 3,36 \text{ м}.$$

Определяем расстояние от стены до светильника:

$$\frac{L}{3} = \frac{3,36}{3} = 1,12 \text{ м}.$$

Светильники будем размещать в четыре ряда. В каждом из этих рядов будет установлено 8 светильников типа ОД. Мощность светильника 30 Вт, длина 0,9 м. Между 8 светильниками будет 7 разрывов в ряду, размер которых составляет 34 см. План размещения светильников в помещении представлен на рисунке 37. В составе каждого светильника имеются две лампы, следовательно, общее число ламп в рассчитанном помещении $n = 112.$

Рассчитаем индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{12 \cdot 6}{2,4 \cdot (12 + 6)} = 1,67.$$

Коэффициент использования светового поток:

$$\eta = 0,67.$$

Проведем расчет светового потока:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot k \cdot Z}{n \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 72 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{112 \cdot 0,67} = 475 \text{ Лм}$$

Определяем световой поток ламп в одном ряду. Выбираем стандартную лампу – ЛД ЛХБ 15 Вт со световым потоком 525 Лм.

Проводим проверку условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \cdot 100\% = \frac{525 - 475}{525} \cdot 100 \leq 20\%$$

Получаем

$$-10\% \leq 9,5\% \leq +20\% - \text{условие выполнено.}$$

Электрическая мощность осветительной установки:

$$P = 112 \cdot 15 = 1680 \text{ Вт.}$$

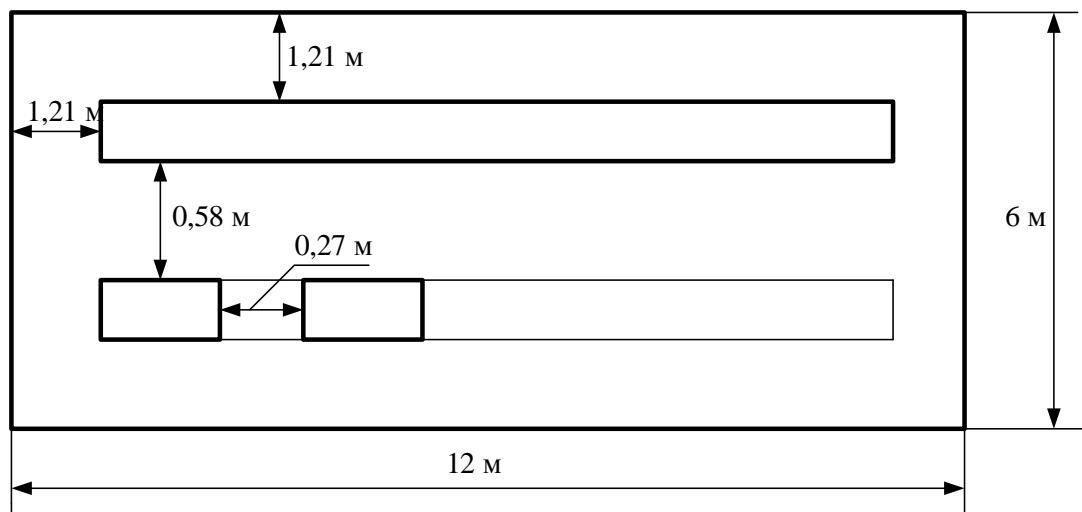


Рисунок 37 – План размещения светильников с люминесцентными лампами

- повышенный уровень шума;

Превышение допустимого уровня шума оказывает влияние на человека, в результате чего у него появляются головные боли, ухудшается слух, а также он

нарушает работу центральной нервной системы и влияет на психические расстройства. При длительном нахождении работника в шумном помещении, его качество и скорость работы уменьшаются, в связи с его переутомлением и невнимательностью[20].

Рекомендуется использовать средства индивидуальной защиты, например, наушники, заглушки, вкладыши. Они эффективно защищают организм от раздражающего действия шума.

- наличие в воздухе взвешенных частиц;

Помещение должно быть оборудовано вытяжным вентилятором, также рабочим необходимо пользоваться средствами индивидуальной защиты, например, респираторами, затычками или специальными наушниками.

Правила, благодаря которым уменьшается уровень профессиональных заболеваний среды работников предприятия:

- На рабочем месте освещенность должна быть не ниже нормы 150 люкс.
- Согласно санитарным нормам, вибрация и шум не могут превышать допустимые значения.
- Температура воздуха в помещении не должна превышать нормальной.

9.3. Охрана окружающей среды

Охрана окружающей среды занимает важнейшее место в человеческой деятельности. Во время работы различных устройств присутствует загрязнение окружающей среды, обусловленное выделением тепла и твердыми отходами.

Характерным примером отрицательного воздействия на природную среду результатов хозяйственной деятельности в нашей стране может служить эксплуатация разветвлённых систем теплоснабжения. Роль этих коммуникаций велика, однако эксплуатационные затраты неуклонно растут вследствие неизбежного старения магистральных участков путей. Влияние на экологию связано с громадными энергопоте-

рями неизолированных труб и отсутствии массовых бытовых систем теплоавтоматики и теплоучёта. Как следствие возрастает количество потребляемой электроэнергии, для производства которой необходимо сжигание большого количества топлива. Современная трубная изоляция обеспечивает значительное сбережение тепла, однако на ветхих магистралях её установка является не целесообразной. Оптимизация теплогидравлических характеристик за счёт приведения их в соответствие с сетью и автоматическое регулирование рабочих параметров насоса позволяет значительно сократить количество аварийных ситуаций, связанных с утечками теплоносителя в окружающую среду. Однако помимо самих утечек значительное влияние на состояние почв и растительности оказывают летние и весенние профилактические ремонтно-монтажные работы.[21].

Утилизация макулатуры.

Переработка макулатуры представляет собой многоэтапный процесс, цель которого заключается в восстановлении бумажного волокна и, зачастую, других компонентов бумаги (таких как минеральные наполнители) и использование их в качестве сырья для производства новой бумаги. Со временем бумага желтеет и обычно для производства новых бумажных изделий вторичное волокно смешивают с новым.

Утилизация металлов.

При обслуживании насосного оборудования необходимо осуществлять замену вышедших из строя частей оборудования насоса или трубопровода. В некоторых случаях производится замена насосов целиком, когда они являются неремонтопригодными. Специальные компании по утилизации забирают оборудование, после чего разбирают агрегат по отдельным элементам, сортируя на детали из пластика, резины и различных металлов. Детали, подходящие для повторного использования, отправляют на переработку, а непригодные для использования в качестве вторичного сырья, сжигают в специальных печах.

9.4. Защита в чрезвычайных ситуациях

Здание по пожароопасности, согласно № 123-ФЗ «Техническому регламенту о требованиях пожарной безопасности», относится к категории Д. Так как, там присутствуют только негорючие материалы, и электрооборудование находится в холодном состоянии, не способным воспламенить пыль.

К самыми распространенными ЧС в процессе разработки и исследования системы автоматизированного регулирования потока воды в системах отопления, можно отнести возгорание и взрыв. Возгорание возникает ввиду того, что при скапливании пыли и прочего материала внутри корпуса и дальнейшего короткого замыкания обмоток двигателя насосного оборудования. До прибытия бригады пожарных необходимо выполнить ряд мероприятий[22]:

1. Обесточить помещение.
2. Закрыть окна, выключить устройство вентиляции воздуха.
3. С помощью имеющихся средств попробовать потушить пожар.
4. Эвакуировать персонал на безопасную территорию.
5. Распознать источник возгорания и сообщить его пожарным.

Пожарная безопасность занимает основное место в технике безопасности.

Существуют мероприятия, способствующие предупреждению возникновения возгорания:

- отсутствие предметов, нарушающих чистоты в помещении;
- поддержание допустимой температуры и давления среды;
- обустройство, специально отведенных мест для курящих сотрудников;
- использование пожароопасного оборудования;
- необходимо следить за имеющимися выходами и лестницами, поддерживать возможность эвакуации с их помощью;
- в помещениях должны быть установлены средства пожаротушения.

Согласно Постановлению правительства № 390 «О противопожарном режиме», для тушения пожаров класса Е, которые наиболее вероятны в рассмат-

риваемом помещении, возможно применение порошковых огнетушителей (ОП) с рангом 4А, в количестве 2шт, которые применяют при тушении горящей изоляции в электроустановке[23].

9.5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

К самостоятельной работе может быть допущен персонал предприятия, который ознакомился со всеми нормами и правилами работы на предприятии, а также сдавший экзамен комиссии по охране труда. До начала самостоятельной работы рабочий проходит первичный инструктаж. Мастер проводит первичный инструктаж сотрудника, а также несет ответственность за его прохождение.

В течение недели после прохождения инструктажа, сотрудник осуществляет работу в присутствии мастера, либо другого работника. По завершению первой недели работы, показав свой профессионализм, работнику оформляют допуск, разрешающий выполнять работы без наблюдателей[24].

Чтобы предотвратить возможные случаи травматизма электрическим током, необходимо знать и выполнять определенные правила:

- Прежде чем приступить к работе, персонал обязан убедиться в отсутствии повреждений и неисправностей оборудования.
- Рабочее место сотрудника, должно соответствовать санитарно-правовым нормам.
- Необходимо, чтобы оборудование, подключенное к сети, имело защитное заземление, прикрепленное к контуру помещения.
- Во время перерывов необходимо обесточить оборудование.
- После окончания работ сотрудник обязан убираться на своем месте работы.

Перечень законодательных и нормативных документов:

1. ГОСТ 12.0.003–74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

2. ГОСТ 12.1.019 -2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
3. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.
4. ГОСТ 12.0.004–2015 ССБТ. Организация обучения безопасности труда. Общие положения.
5. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление.
6. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
7. ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования.
8. СНиП 23-03-2003. Защита от шума.
9. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий
10. Федеральный закон № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»
11. ГОСТ 12.1.004–91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.
12. ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования.
13. Постановление правительства № 390 «О противопожарном режиме».

Мероприятия и цели, связанные с управлением охраной труда:

- создаются, безопасные для работника, условия труда;
- снижают риск возникновения аварийных ситуаций;

Данные мероприятия и цели достигают, благодаря заблаговременному предупреждению чрезвычайных ситуаций:

- классификация и анализ опасностей;

- проведение разъяснительных бесед с сотрудниками предприятия.

Вывод по разделу

Были рассмотрены вопросы охраны труда и безопасности труда. Произведен расчет освещения рабочего места сотрудника. Описаны мероприятия по предотвращению чрезвычайных ситуаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной практики являлся вопрос исследования возможной структуры РЭП насоса на основе комплектного преобразователя частоты FDU 40-090 СЕВ.

В работе предложено реализовать систему РЭП насоса как систему автоматического управления, выполненную на модульной, программно-перестраиваемой структуре с возможностью реализации законов векторного управления с замкнутыми контурами тока, потока и давления.

В результате исследования статического режима работы скалярного управления установлено, что электропривод обеспечивает заданную область работы в указанном диапазоне регулирования скорости, что удовлетворяет техническому заданию.

В ходе имитационного моделирования динамических режимов работы установлено, что разработанная система отрабатывает заданную диаграмму движения, обеспечивая требуемые показатели качества:

- давление выходит на заданное значение с величиной перерегулирования не более 0,01 базового значения;

- время переходного процесса не превышает 3 с.

Преимущество векторного закона регулирования над скалярным заключается в повышенном качестве переходных характеристик, однако при этом необходимо осуществить настройку регуляторов контуров потока и тока, правильно выбрав постоянные времени контуров. Процесс оптимизации параллельных контуров соответствует оптимизации системы двухзонного электропривода постоянного тока без учёта влияния перекрёстных обратных связей. В системе векторного частотно-токового управления в момент пуска в соответствии с настройкой параметров регулятора переходный процесс тока должен иметь апериодический характер с максимальным значением I_{max} , однако вследствие влияния отрицательной связи во втором уравнении системы 3.33, в кривой тока и соответственно момента наблюдается провал.

Список литературы

1. Авдолимов Е.М. Реконструкция водяных тепловых сетей. — М.: Стройиздат, 1990.
2. Насосы с сухим ротором: Grundfos Каталог 2010, 4-е изд.-М.: 2010.-118 с.
3. Преобразователь давления Danfoss MBS-1700 [Офиц. сайт]. URL: <http://products.danfoss.ru/productrange/visuals/industrialautomation/pressure-transmitters/mbs-1700.html> (дата обращения: 24.03.2018).
4. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч.8.Асинхронный частотно-регулируемый электропривод. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. — 448 с
5. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых электроприводах. — Чебоксары: 1998. — 172 с.
6. Электрические машины: в 2-х ч. Ч. 1: Учеб. для электротехн. спец. вузов. — 2-е изд. перераб. и доп. /Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. — М.: Высш. шк., 1987.- 319 с.
7. Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК.- СПб.: КОРОНА принт,2003. — 256 с.
8. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей/Под ред. Л.Г. Мамиконянца. — 4-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 240 с.
9. Преобразователь частоты Flowdrive FDU: Руководство по эксплуатации — М.: 2003. — 83с.
10. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. — М.-Л.: Госэнергоиздат,1963.
11. Дементьев Ю. Н., Чернышев А. Ю., Чернышев И. А. Электрический привод: учебное пособие. — Томск: Изд-во ТПУ,2010. — 232 с

12. Гусяцкий Ю.М. Синтез быстродействующей системы частотно-управляемого асинхронного электропривода. Электричество. 1982. №10.
13. Чернышев А. Ю., И. А. Попов Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя с учётом изменения его температуры. — Томск: Изд-во ТПУ, 2009. — 393-396 с.: ил.
14. Елисеев В. А. Справочник по автоматизированному электроприводу. — М.: Энергоатомиздат: 1983. 616 с.
15. ГОСТ 12.0.003–74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
16. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Защитное заземление, зануление
17. ГОСТ 12.0.004–90 ССБТ. Обучение работающих безопасности труда
18. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования (с Изменением N 1)
19. ГОСТ 12.1.019 -2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
20. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
21. СНиП П-12-77. Защита от шума.
22. ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования.
23. ГОСТ 12.1.004–91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.
24. ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования.

Приложение А

AUTOMATIC SYSTEM FOR WATER PRESSURE CONTROL IN HEATING SYSTEMS

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM6Л	Коваль Сергей Александрович		

Консультант отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Образцов К.В.			

Консультант – лингвист отделения ИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Соколова Э.Я.			

INTRODUCTION

The current state of heat supply systems requires significant capital investments for upgrading main power transmission lines. The primary aim is the increase of the service life of the heating mains. The solution of this problem can be accomplished by optimizing the heat and hydraulic characteristics and bringing the parameters of the trunk to real load. The use of pressure control systems in a water intake allows solving a part of this problem. From a practical point of view, it is possible to adjust the pressure using adjustable speed drives (ASD). Currently, the electric drive of most installations is based on induction motors with a squirrel-cage rotor controlled by a frequency converter [1].

However, most industrial enterprises have an actuator with an electric motor. A «frequency converter-induction motor» system in comparison with DC drives, has its advantages and disadvantages. The main advantage is simplicity in system setup and operation. The main disadvantage is high cost of a frequency converter. This system has a number of features:

1. A variety of frequency converters with the same technical characteristics;
2. Possibility of flow and torque control on the stator side;
3. Application of a rotating coordinate system to consider processes in an induction motor.

The aim of the thesis is to consider vector frequency-current control to construct a simulation model in a rotating coordinate system with the subsequent implementation of a main pump in the heating network in the ASD system.

Model of squirrel-cage induction motor

Induction motor equations in per-unit system

Amplitude of the instantaneous value of the nominal phase voltage is calculated according to following equation:

$$U_b = \sqrt{2} \cdot U_{1f} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311,13 \text{ V}; \quad (1.1)$$

Amplitude of the instantaneous value of the nominal phase current is calculated according to following equation:

$$I_b = \sqrt{2} \cdot I = \sqrt{2} \cdot 84,22 = 311,13 \text{ A}; \quad (1.2)$$

Resistance is calculated according to following equation:

$$R_b = \frac{U_b}{I_b} = \frac{311,13}{119,1} = 2,6123 \text{ Ohm}; \quad (1.3)$$

Rated angular frequency of the motor supply voltage in its nominal mode is calculated according to following equation:

$$\omega_b = 2 \cdot \pi \cdot f_c = 2 \cdot 3,14159 \cdot 50 = 314,159 \frac{\text{rad}}{\text{s}}; \quad (1.4)$$

Linkage is calculated according to the following equation:

$$\Psi_b = \frac{U_b}{\omega_b} = \frac{311,13}{314} = 0,99 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{rad}}; \quad (1.5)$$

Electromagnetic torque is calculated according to following equation:

$$M_b = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{U_b \cdot I_b}{\omega_b} = \frac{3}{2} \cdot \frac{311,13 \cdot 119,1}{314} = 176,93 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{rad}}; \quad (1.6)$$

Time is calculated according to following equation:

$$t_b = \frac{1}{\omega_b} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00318 \text{ s}. \quad (1.7)$$

Since in the future we will mainly use equations in the relative system of units (in the dimensionless form). The nomenclature for current, voltage, flux linkage, and resistance will be left the same. In order to write the vector equation (1.1) in a dimensionless form, it is necessary to divide the equation to the U_b . Taking into account (3.12), (3.13) in relative units, the following set of equations will be obtained:

$$\begin{aligned} U_1 &= I_1 \cdot r_1 + \frac{d\Psi_1}{d\tau} + jv_{rs} \cdot \Psi_1; & \Psi_1 &= x_1 \cdot I_1 + x_m \cdot I_2; \\ U_2 &= I_2 \cdot r_2 + \frac{d\Psi_2}{d\tau} + j(v_{rs} - v) \cdot \Psi_2; \\ \Psi_2 &= x_m \cdot I_2 + x_2 \cdot I_1; \end{aligned} \quad (1.8)$$

where $v_{rs} = \frac{\omega_{rs}}{\omega_b}$, $v = \frac{\omega_r}{\omega_b}$, is the relative rotation speed of the coordinate system and the electric speed of the motor shaft. In this equation, the resistances r_1 and r_2 are also represented in relative units. If there is no power supply from the rotor side, it should be assumed in (1.8) $\vec{U}_2 = 0$.

Similarly, equation (1.3) in relative units can be written in the form:

$$\begin{aligned} U_1 &= I_1 \cdot r_1 + \frac{d}{d\tau} (x_1 \cdot I_1 + x_m \cdot I_2) + jv_{rs} (x_1 \cdot I_1 + x_m \cdot I_2); \\ U_2 &= I_2 \cdot r_2 + \frac{d}{d\tau} (x_m \cdot I_1 + x_2 \cdot I_2) + j(v_{rs} - v_r) (x_1 \cdot I_1 + x_m \cdot I_2); \end{aligned} \quad (1.9)$$

where $x_1 = \frac{\omega_b \cdot L_1}{R_b}$, $x_2 = \frac{\omega_b \cdot L_2}{R_b}$, $x_m = \frac{\omega_b \cdot L_m}{R_b}$ — inductive resistance of the motor windings in per-unit system.

Equations for the motor torque in per-units are obtained after dividing (1.7), (1.8) by M_b :

$$\begin{aligned} \vec{\mu} &= \vec{\Psi}_1 \times \vec{I}_1; & \mu &= \text{Im} \left[\vec{I}_1 \cdot \vec{\Psi}_1^* \right] = (\psi_{1x} \cdot i_{1y} - \psi_{1y} \cdot i_{1x}); \\ \vec{\mu} &= x_m \cdot \left[\vec{I}_2 \times \vec{I}_1 \right]; & \mu &= x_m \cdot \text{Im} \left[\vec{I}_1 \cdot \vec{I}_2^* \right] = x_m (i_{2x} \cdot i_{1y} - i_{1x} \cdot i_{2y}). \end{aligned} \quad (1.10)$$

Using the coupling equations between the vectors of flux linkages and currents (1.2), the moment can be expressed in terms of any pair of vectors $\vec{I}_1, \vec{I}_2, \vec{\Psi}_1, \vec{\Psi}_2$ and in addition:

$$\mu = \frac{x_m}{x_2} \cdot \text{Im}[\dot{I}_1 * \bar{\Psi}_2] \quad \mu = \frac{x_m}{x_1 \cdot x_2 \cdot \sigma} \cdot \text{Im}[\bar{\Psi}_1 * \bar{\Psi}_2], \quad (1.11)$$

where $\sigma = 1 - \frac{x_m^2}{x_1 \cdot x_2}$ – coefficient of leakage.

The equation of motion of the motor in per-units is obtained by dividing (1.6) by M_b :

$$\mu - \mu_c = H \cdot \frac{dv}{d\tau}, \quad (1.12)$$

where $H = \frac{J \cdot \omega_b^2}{M_b \cdot p}$ – equivalent of the moment of inertia in per-unit system.

The equations of an induction squirrel-cage machine are obtained from (1.12) if the rotor windings are short-circuited [2].

To build a model of an induction motor, it is necessary to bring the calculated basic machine parameters to a system of per-units.

Rotational speed of the coordinate system is calculated according to following equation [4]:

$$v_{rs} = \frac{\omega_{rs}}{\omega_b} = 1; \quad (1.13)$$

Rotor speed is calculated according to following equation:

$$v = \frac{\omega_r}{\omega_b} = \frac{2950}{3000} = 0,9833; \quad (1.14)$$

Active resistance of the stator winding is calculated according to following equation:

$$r_1 = \frac{R_1}{R_b} = \frac{0,09599}{2,6123} = 0,0368; \quad (1.15)$$

Active resistance of the rotor winding is calculated according to following equation:

$$r_2 = \frac{R_2}{R_b} = \frac{0,04742}{2,6123} = 0,01815; \quad (1.16)$$

Inductive resistance of the stator winding is calculated according to following equation:

$$x_1 = \frac{X_1 + X_\mu}{R_b} = \frac{0,1745 + 13,698}{2,6123} = 5,1305; \quad (1.17)$$

Inductive resistance of the rotor winding is calculated according to following equation:

$$x_2 = \frac{X_2 + X_\mu}{R_b} = \frac{0,2381 + 13,698}{2,6123} = 5,3348; \quad (1.18)$$

Inductive resistance of the excitation circuit is calculated according to following equation:

$$x_m = \frac{X_m}{R_b} = \frac{13,698}{2,6123} = 5,2437; \quad (1.19)$$

Moment of inertia is calculated according to following equation:

$$H = \frac{J \cdot \omega_b^2}{M_b \cdot p} = \frac{0,15 \cdot 314,159^2}{176,93 \cdot 1} = 83,676; \quad (1.20)$$

To construct a structural model of an induction electric motor, we change the system of equations (3.25) in the form:

$$U_1 = \left(r_1 + r_2 \left(\frac{x_m}{x_2} \right)^2 \right) \cdot I_1 + \left(x_1 - \frac{x_m^2}{x_2} \right) \frac{dI_1}{d\tau} + jv_{rs} \left(x_1 - \frac{x_m^2}{x_2} \right) I_1 - \frac{x_m \cdot r_2}{x_2^2} \Psi_2 + j \frac{x_m}{x_2} v_r \Psi_2, \quad (1.21)$$

$$0 = - \frac{x_m \cdot r_2}{x_2} I_1 + \frac{r_2}{x_2} \Psi_2 + \frac{d\Psi_2}{d\tau} + j(v_{rs} - v_r) \Psi_2 \quad (1.22)$$

The following dimensionless coefficients will be taken:

$$r = (r_1 + k_2^2 r_2), \quad x_1' = \left(x_1 - \frac{x_m^2}{x_2} \right), \quad k_2 = \frac{x_m}{x_2}, \quad T_2 = \frac{x_2}{r_2}. \quad (1.23)$$

To construct the model, the values of the dimensionless coefficients will be determined:

$$k_2 = \frac{x_m}{x_2} = \frac{5,2437}{5,3348} = 0,979; \quad (1.24)$$

$$T_2 = \frac{x_2}{r_2} = \frac{5,3348}{0,01815} = 270,947; \quad (1.25)$$

$$x_1' = \left(x_1 - \frac{x_m^2}{x_2} \right) = \left(5,1305 - \frac{5,2437^2}{5,3348} \right) = 0,181; \quad (1.26)$$

$$r = (r_1 + k_2^2 r_2) = (0,0368 + 0,979^2 \cdot 0,01815) = 0,03319; \quad (1.27)$$

$$T_1 = \frac{x_1'}{r} = \frac{0,181}{0,03319} = 5,445. \quad (1.28)$$

To write this combined equations in operator form in a moving coordinates system with a rotating speed v_{rs} . To expand this vector quantities on the projection of the real and imaginary axes x and y respectively and change the system it is necessary to use the following equation: $p = \frac{d}{d\tau}$, where p – Laplace operator [3].

$$\begin{aligned} U_{1x} &= r \left(1 + \frac{x_1}{r} p \right) I_{1x} - x_1 v_{rs} I_{1y} - \frac{k_2}{T_2} \Psi_{2x} - k_2 v_r \Psi_{2y} \\ U_{1y} &= r \left(1 + \frac{x_1}{r} p \right) I_{1y} - x_1 v_{rs} I_{1x} - \frac{k_2}{T_2} \Psi_{2y} - k_2 v_r \Psi_{2x} \\ 0 &= -k_2 r_2 I_{1x} + \frac{1}{T_2} \Psi_{2x} + p \Psi_{2x} - (v_{rs} - v_r) \Psi_{2y} \\ 0 &= -k_2 r_2 I_{1y} + \frac{1}{T_2} \Psi_{2y} + p \Psi_{2y} - (v_{rs} - v_r) \Psi_{2x} \end{aligned} \quad (1.29)$$

The equation of motion of the electric drive will be written (1.28) and the expression for the torque (1.29) in the rotating coordinate system in the operator form is:

$$H \cdot p \cdot v_r = \mu - \mu_c, \quad (1.30)$$

$$\mu = k_2 (\Psi_{2x} \cdot I_{1y} - \Psi_{2y} \cdot I_{1x}). \quad (1.31)$$

The resulting system of equations for a mathematical model of an induction electric drive in a rotating coordinate system can be presented as:

$$\left\{ \begin{aligned} r(1 + T_1 p) I_{1x} &= U_{1x} + x_1 v_{rs} I_{1y} + \frac{k_2}{T_2} \Psi_{2x} + k_2 v_r \Psi_{2y} \\ r(1 + T_1 p) I_{1y} &= U_{1y} + x_1 v_{rs} I_{1x} + \frac{k_2}{T_2} \Psi_{2y} + k_2 v_r \Psi_{2x} \\ \frac{(1 + T_2 p)}{T_2} \Psi_{2x} &= k_2 r_2 I_{1x} + (v_{rs} - v_r) \Psi_{2y} \\ \frac{(1 + T_2 p)}{T_2} \Psi_{2y} &= k_2 r_2 I_{1y} + (v_{rs} - v_r) \Psi_{2x} \\ H \cdot p \cdot v_r &= \mu - \mu_c \\ \mu &= k_2 (\Psi_{2x} \cdot I_{1y} - \Psi_{2y} \cdot I_{1x}) \end{aligned} \right. \quad (1.32)$$

where $T_1 = \frac{x_1'}{r}$.

Figure 38 shows the block diagram of an induction electric motor, compiled from the system of equations (1.32).

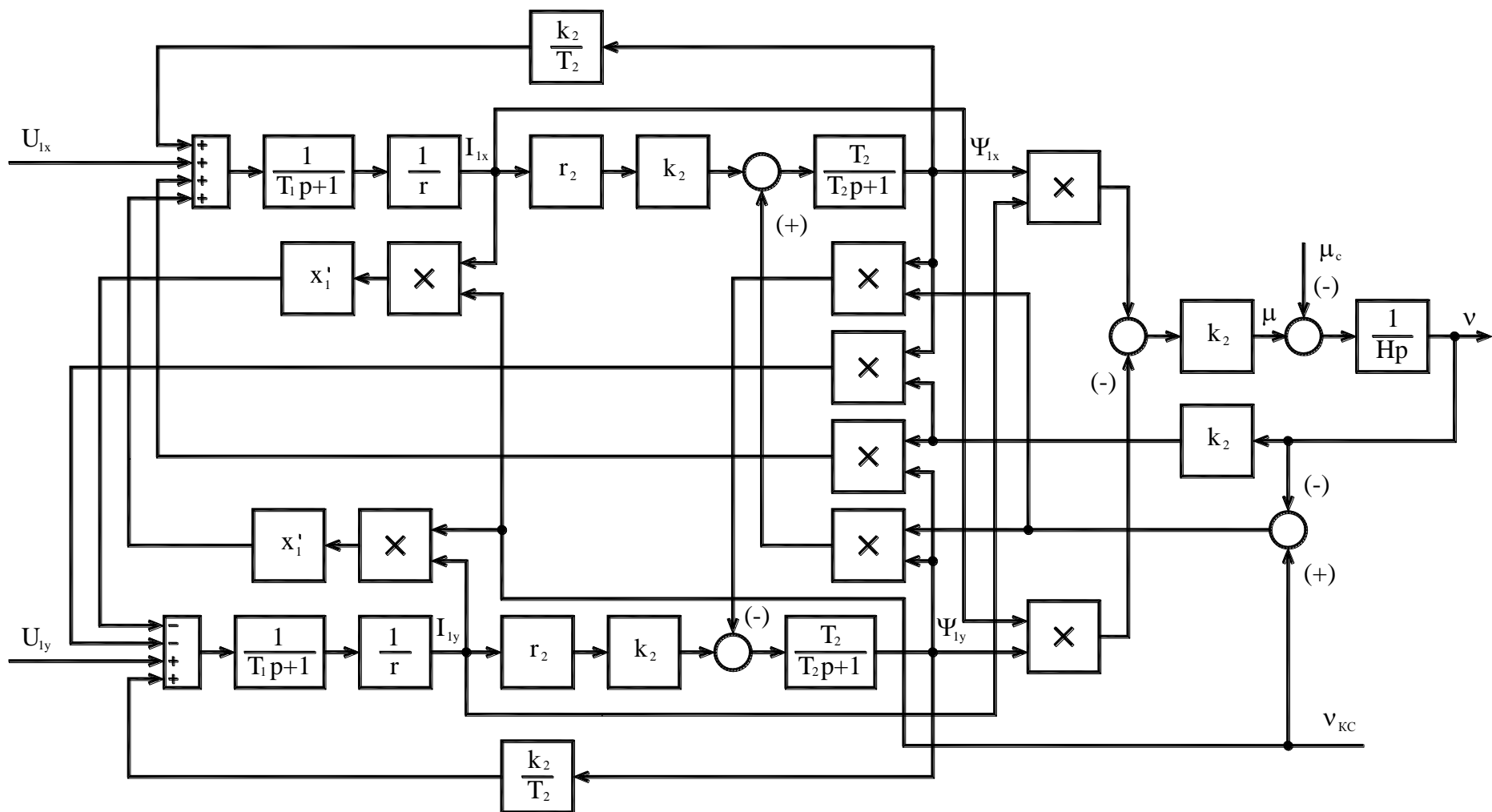


Figure 1. Block diagram of an induction electric motor model in a rotating coordinate system

Simulation model of induction motor in MATLAB

The induction motor and electric drive are simulated in MATLAB/SIMULINK[4].

If the problem requires the creation of any special tools, MATLAB provides users with virtually universal language of the order of object-oriented programming in conjunction with the various debugging tools. The structure of this package allows you to combine the basic approaches to create a model: analytical and imitative approach.

As the elements to build a model using SIMULINK tools, the modules located in the corresponding library are used. Another advantage of the SIMULINK library is that it is an open system. The library can be replenished by developing its own blocks. The block library SIMULINK represents a set of visual objects, using which you can collect, as from cubes, an arbitrary design. Practically for all blocks there is an opportunity of individual settings: it is possible to adjust both internal and external parameters of blocks. The connection order of blocks is not imposed by any restrictions, but it is necessary to observe a number of rules, based on the logic of the model itself, and not by special requirements of SIMULINK.

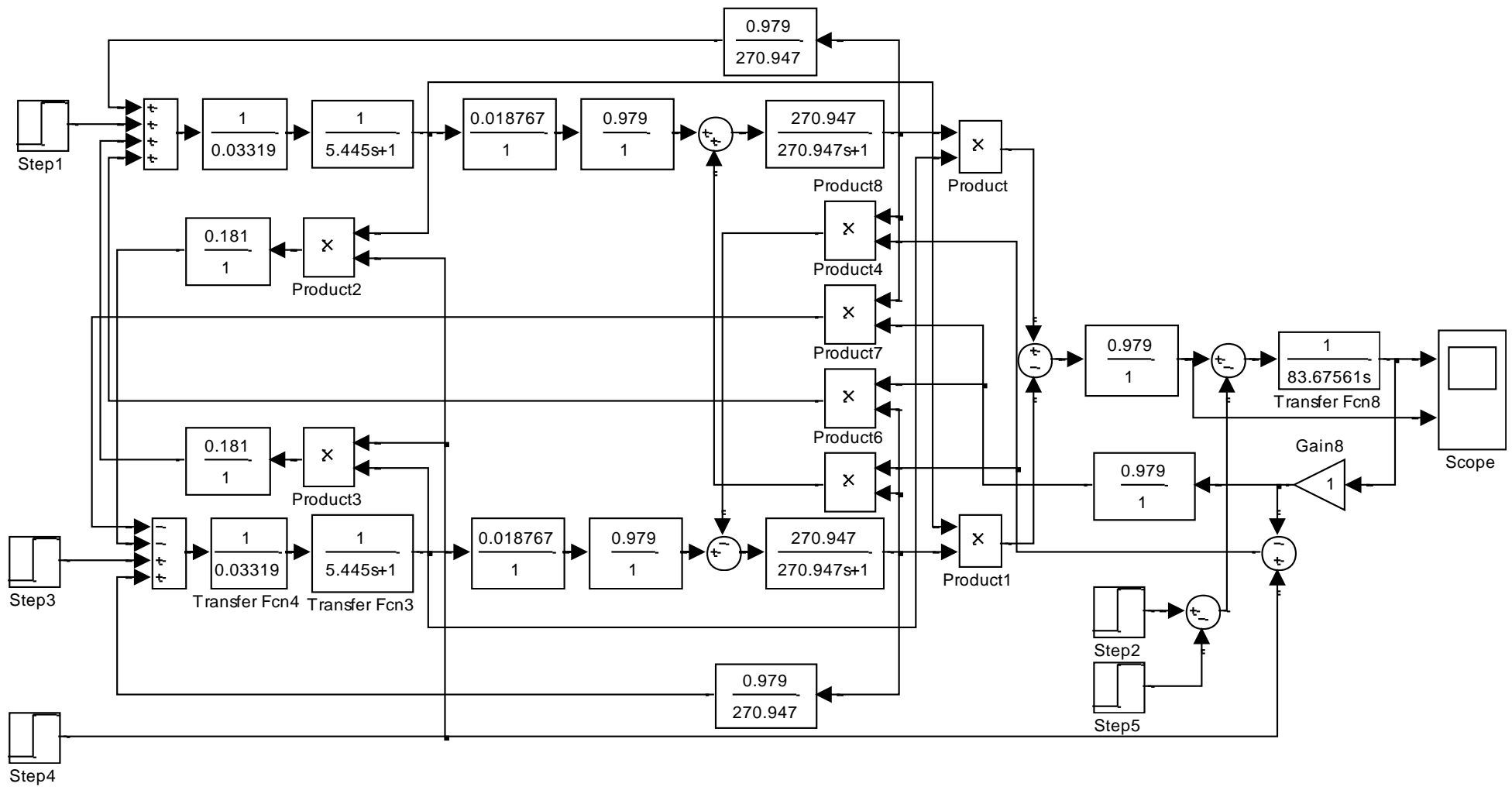


Figure 2. Simulation model of an induction motor in the MATLAB

Load characteristics of an induction motor in a direct start mode

Firstly the fan-duty load torque is used in this model, where the quadratic dependence of the load torque on the rotational speed of the motor shaft corresponds in the per-unit system[5]:

$$\mu_c = \frac{M_n \cdot \omega_b^2}{\omega_b^2 \cdot M_b} \cdot v^2 = \frac{145,68 \cdot 314,159^2}{308,92^2 \cdot 176,93} \cdot v^2 = 0,8515 \cdot v^2 \text{ r.u.} \quad (1.33)$$

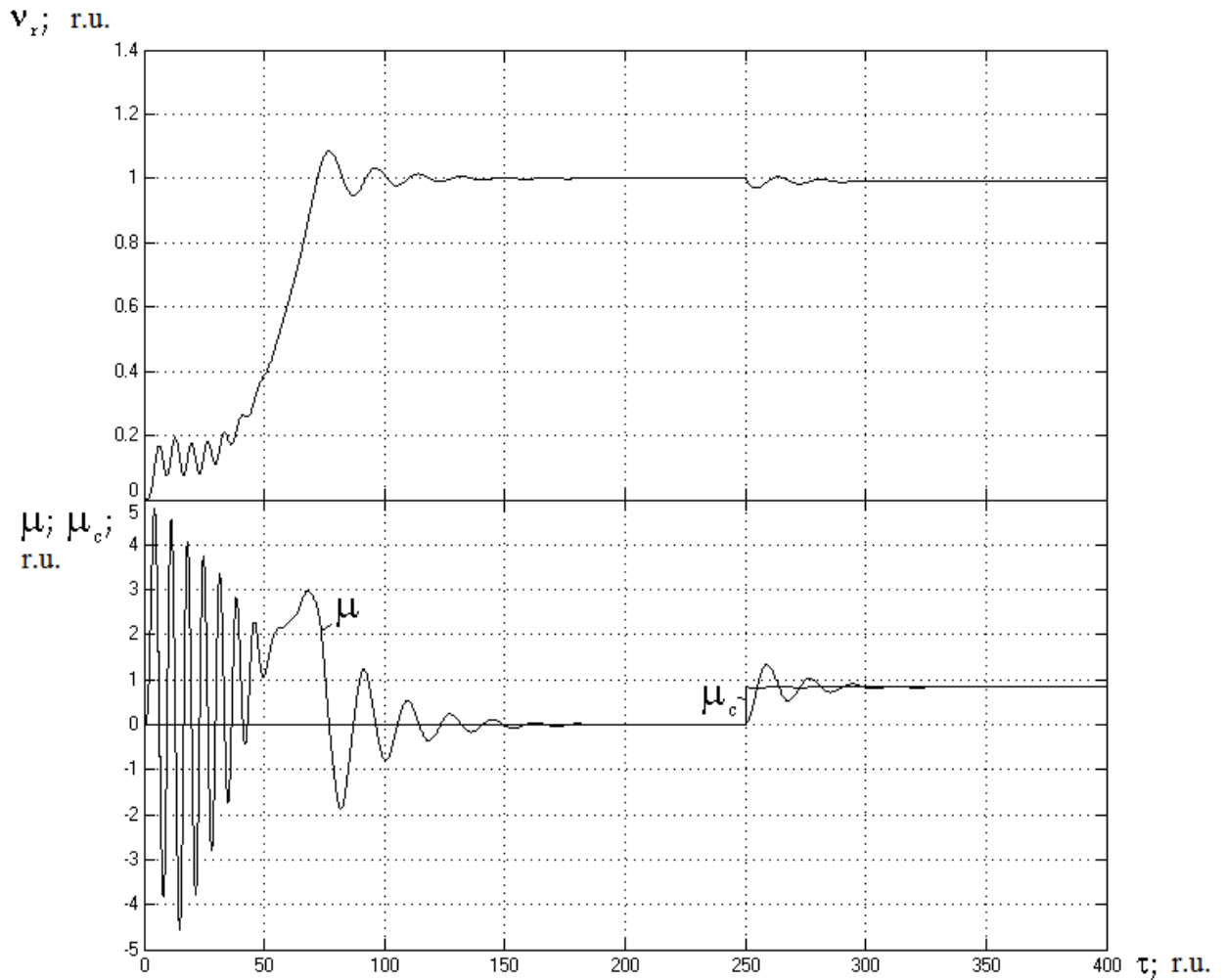


Figure 3. Time characteristics $v_r = f(\tau)$, $\mu = f(\tau)$ at starting the induction motor at idle speed

Table 1 – Main quality indicators for speed $v_r = f(\tau)$

Quality indicators	Formula
Overcontrol	$\sigma = 8 \%$
Vibration	$n = 1$
Adjustment time	$t_a = 87 \cdot t_b = \frac{87}{314,159} = 0,277 \text{ s.}$
Steady-state value	$\omega_{ss} = 1 \cdot \omega_b = 1 \cdot 314,159 = 314,159 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
After adding a load	$\omega_{ss1} = 0,983 \cdot \omega_b = 0,983 \cdot 314,159 = 308,92 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

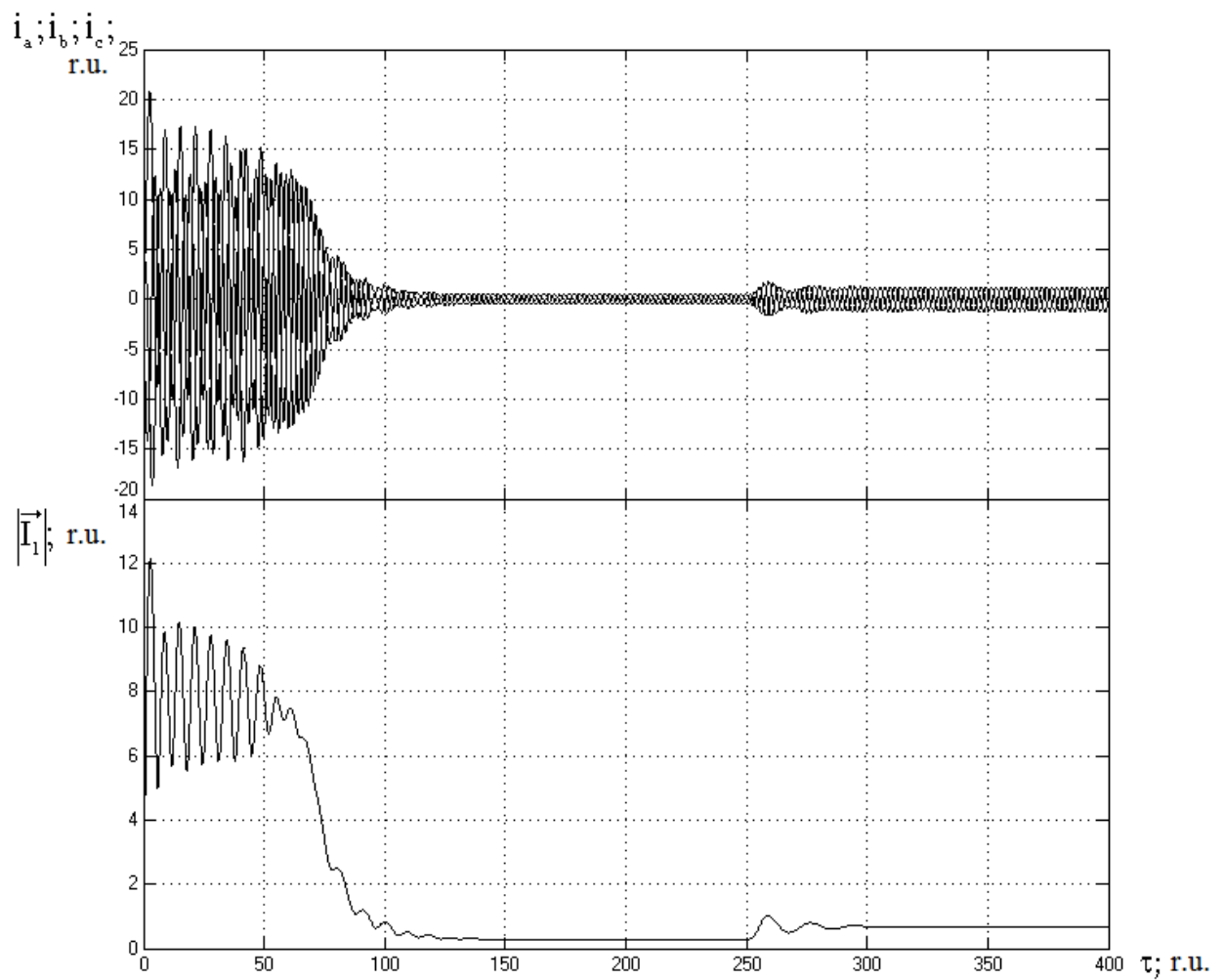


Figure 4. Time characteristics $i_a = f(\tau)$; $i_b = f(\tau)$; $i_c = f(\tau)$; $|\vec{I}_1| = f(\tau)$ with idle start and following load surge

Steady-state effective value of stator winding current:

At idle: $I_1 = 0,3 \cdot I_b = 0,3 \cdot 119,1 = 35,73 \text{ A}$.

Under load: $I_1 = 0,7 \cdot I_b = 0,7 \cdot 119,1 = 83,37 \text{ A}$.

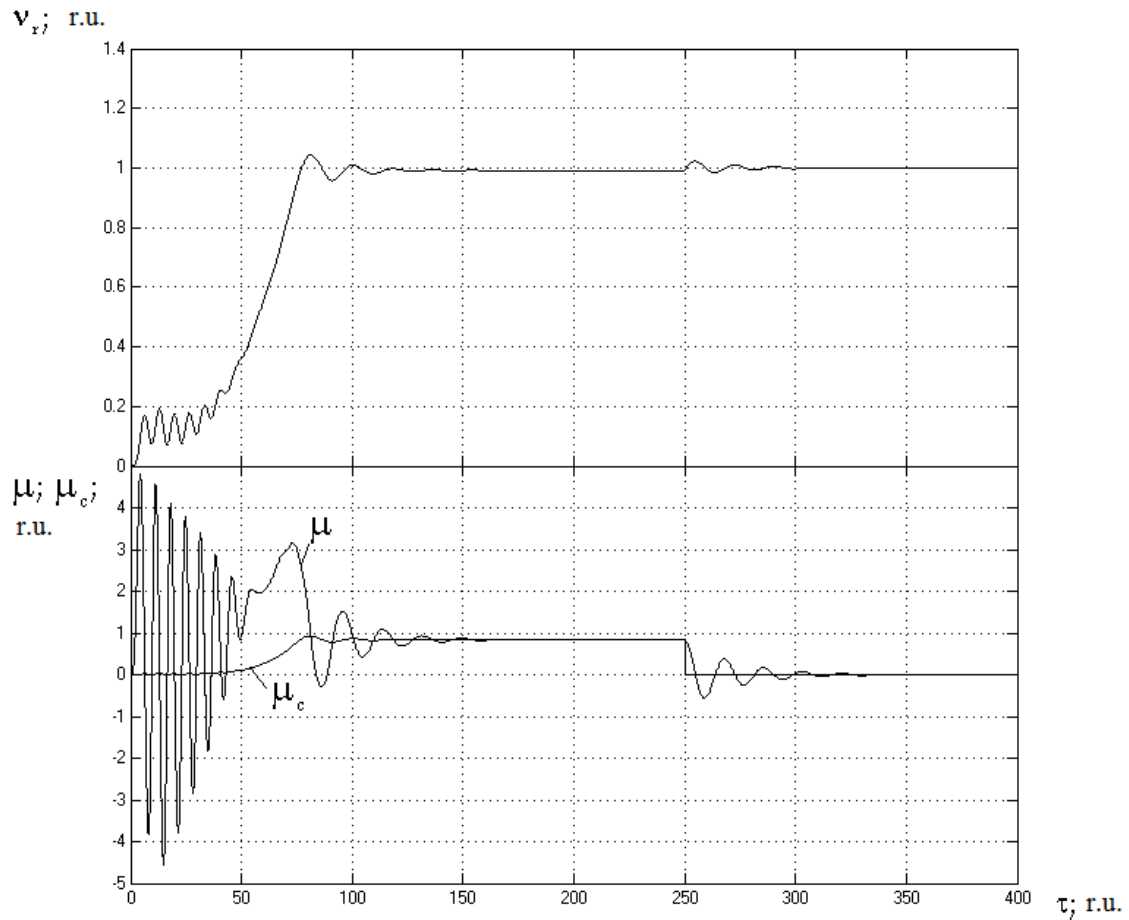


Figure 5. Time characteristics $v_r = f(\tau)$, $\mu = f(\tau)$, with load start and following load drop

Table 2 – Main quality indicators for speed $v_r = f(\tau)$

Quality indicators	Formula
Overcontrol	$\sigma = 6,4 \%$
Vibration	$n = 0$
Adjustment time	$t_a = 75 \cdot t_b = \frac{75}{314,159} = 0,239 \text{ s.}$
Steady-state value	$\omega_{ss} = 0,983 \cdot \omega_b = 0,983 \cdot 314,159 = 308,92 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$
After adding a load	$\omega_{ss1} = 1 \cdot \omega_b = 1 \cdot 314,159 = 314,159 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

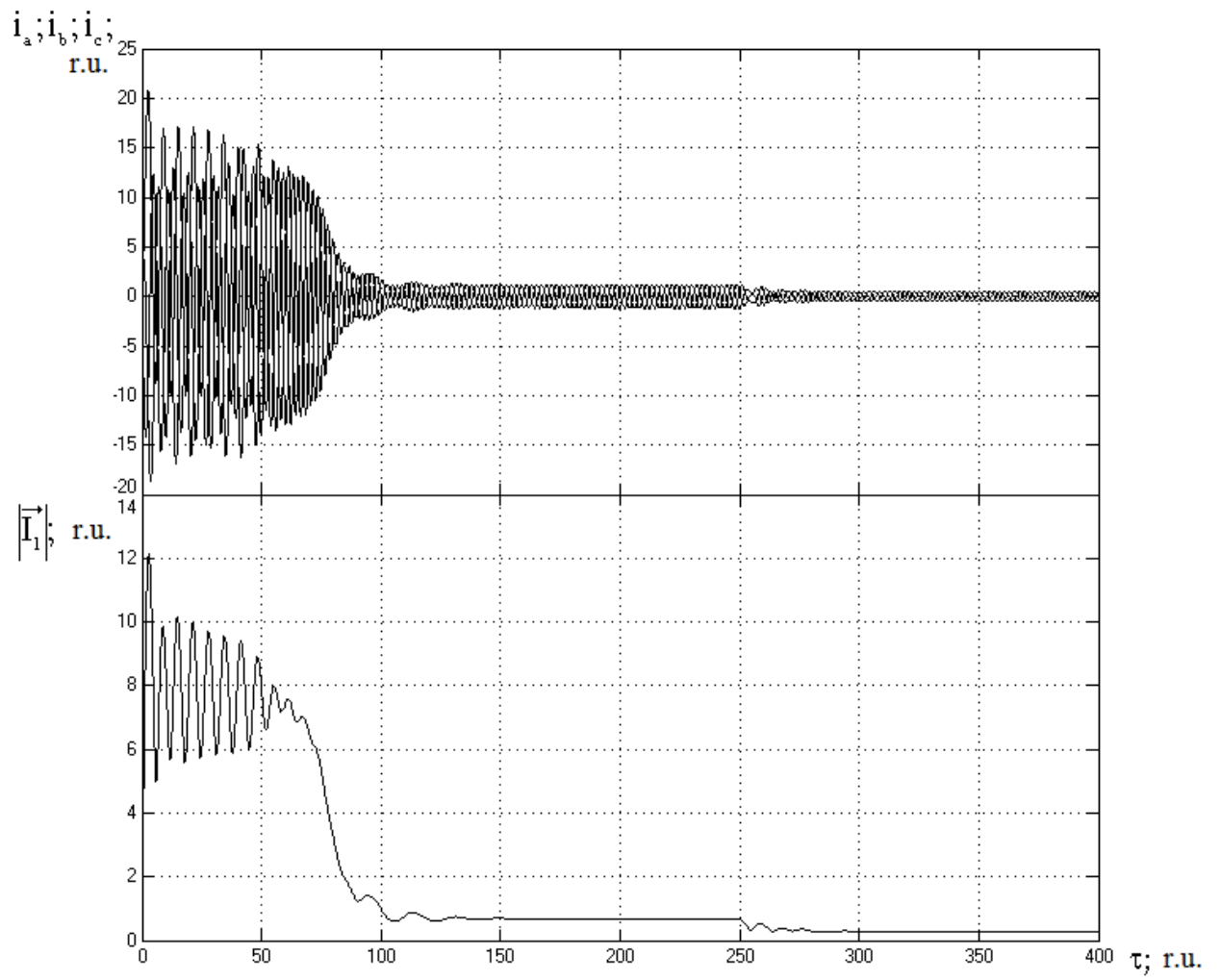


Figure 6. Time characteristics $i_a = f(\tau)$; $i_b = f(\tau)$; $i_c = f(\tau)$; $|\vec{I}_1| = f(\tau)$ with load start and load drop

Steady-state effective value of stator winding current is:

- At load start: $I_1 = 0,7 \cdot I_b = 0,7 \cdot 119,1 = 83,37 \text{ A}$.
- At idle start: $I_1 = 0,3 \cdot I_b = 0,3 \cdot 119,1 = 35,73 \text{ A}$.

Conclusion

The type of transient curves during the direct start of an induction motor shows the presence of an oscillatory component in the curve of the electromagnetic torque with a frequency of 43 Hz. When the dynamic characteristic reaches its critical value, the induction motor has the maximum acceleration. Starting under the load is accompanied by a lower speed overshoot. When the speed is reached the desired value, the motor torque tends to balance the load value. Load variations lead to a corresponding drop in speed. As a result, the direct start of an induction motor does not allow obtaining sufficient transient characteristics under the condition of possible load variations, which results in speed decrease and the presence of vibrational components in the torque characteristic.

References

1. German-Galkin S. G. Electric machines: textbook (2003).
2. Bruskin D. E., Zorohovich A. E., Khvostov: Electrical machines and mikromashiny: Moscow. (1971): 162-190.
3. Pozdeev A. D. Electromagnetic and Electromechanical Processes in Frequency Controlled Asynchronous Electric Motor Drives. Cheboksary Chuvash University (1998): 161-172.
4. Gussyatsky Yu.M. Synthesis of a high-speed system of a frequency-controlled asynchronous electric drive. Electricity.no 10 (1982): 121-132.
5. Kolomiyet E. A., Chernyshyov A. Y. Observer of Rotor Speed and Flux is Developed for the Vector Control System of Induction Motor. International Siberian Conference on Russia, (2015): 62-57.